

AMATÉRSKÉ RÁDIOR

NOSITEL
VÝZNAMENÁ
ZA BRANNOU
VÝCHOVU
I. A.II. STUPNĚ

ŘADA B PRO KONSTRUKTÉRY

ČASOPÍS PRO ELEKTRONIKU A AMATÉRSKÉ VYSÍLÁNÍ

ROČNÍK XXXIII/1984 ● ● ČÍSLO 2

V TOMTO SEŠITĚ

Jak dál	41
REPRODUKTORY A REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY	
1. Úvod	42
2. Zdroje akustické energie a podstata jejich činnosti	42
3. Základní pojmy a vztahy	43
4. Akustické zařízení	44
5. Druhy reproduktoru, jejich funkce a vlastnosti	47
5.1 Přimovýzajíží reproduktory	48
6. Nepřimovýzajíží reproduktory	52
7. Reproduktorová ozvučnice	53
7.1 Desková ozvučnice	54
7.2 Otevřená skříňová ozvučnice	55
7.3 Uzavřená ozvučnice	55
7.4 Bass-reflexová ozvučnice	56
8. Reproduktorové soustavy	59
8.1 Výhbyky soustav napájených z jediného výkonového zosilovače	60
8.2 Prvky pasivních výhybek	63
8.3 Překážky před reproduktory	65
9. Aktivní reproduktorové soustavy	65
10. Měření reproduktoru a jednotek pro vyzařování akustického signálu	66
11. Závěr	71
Aktivní reproduktorová soustava	73
Vědět jak na to	77

AMATÉRSKÉ RÁDIO ŘADA B

Vydává ÚV Svatarmu ve vydavatelství NAŠE VOJSKO, Vladislavova 26, 133 66 Praha 1, tel. 26 06 51-7. Šéfredaktor ing. Jan Klábal, redaktor Luboš Kalousek, OKIFAC. Redakční radu řídí Ing. J. T. Hyun.

Redakce Jungmannova 24, 113 66 Praha 1, tel. 26 06 51-7. Šéfredaktor linka 354, redaktor linka 353, sekretářka linka 355. Ročně vydje 6 čísel. Cena výtisku 5 Kčs, poštovní předplatné 15 Kčs. Rozšířuje PNS, v jednotkách ozbrojených sil vydavatelství NAŠE VOJSKO, administrace Vladislavova 26, Praha 1. Objednávky přijímá každá pošta i doručovatel: Objednávky do zahraničí vyfizuje PNS, ústřední expedice a dovoz tisku, závod 01, Kafkova 9, 160 00 Praha 6. Tiskna NAŠE VOJSKO, n. p., závod 08, 160 05 Praha 6, Vlastina ulice č. 889/23.

Za původnost a správnost příspěvku odpovídá autor. Návštěvy v redakci a telefonické dotazy pouze po 14. hodině. Číslo indexu 46 044.

Toto číslo má vystoupit podle plánu 20. 3. 1984.

© Vydavatelství NAŠE VOJSKO

JAK DÁL?

Ke zdárnému splnění náročných úkolů v rozvoji elektronizace, kybernetizace a automatizace národního hospodářství je mimo jiné důležité dosáhnout půdstatného zvýšení zájmu o tyto obory a celkové informovanosti širší veřejnosti. Je třeba, aby zejména vedoucí a vývojoví pracovníci, ale i střední technické kádry neelektronických oborů (jako jsou např. lehká a těžká strojírenství, doprava, administrativa, stavebnictví, zemědělství, potravinový, textilní a spotřební průmysl, družstevní organizace i ČSLA a studijní a učební zařízení atd.) měli hlubší znalosti o elektronice a mikroelektronice a mohli tak účinněji prosazovat její aplikace do nově vyvijených zařízení. Názornou ukázkou potřeb v tomto směru byla i výstava „Elektronika a automatizace“, pořádaná ve Sjezdovém paláci PKOJF v Praze. Doplňující znalosti mohou uvedení pracovníci získat bud školským, nebo individuálním studiem. Ve školách všechno stupně se výuka rozšiřuje rozvojem nové výchovně vzdělávacích soustav, v nichž se zvyšuje rozsah výuky informatiky, kybernetiky, elektroniky i automatizační a výpočetní techniky. K organizovanému vzdělávacímu procesu patří i různé kurzy a školení na základě dohod mezi resortem elektrotechnického průmyslu a ČSVTS, Svazarmem, Socialistickým svazem mládeže a Socialistickou akademii, díky které bylo v průběhu školního roku 1982-83 vyskočeno téměř pět set lektorů pro práci se školními mikropočítači. Je to základ pro splnění zámeru připravit 100 tisíc odborníků pro zavádění mikroelektroniky do národního hospodářství. Připravení lektori se mohou dále školit ve střediscích ČSVTS, Svazarmu, SSM a Socialistické akademie.

To ovšem neznamená, že posluchači po ukončení kurzu, stejně jako absolventi odborných škol mohou zůstat jen u získaných vědomostí. Elektronika se v současné době rozvíjí velmi rychlým tempem, a co je dnes špičkou, to bude již zítra zastaralé. Je proto třeba stále se průběžně seznamovat s novými konstrukcemi, návrhy a řešeními elektronických obvodů a to v co nejkraťším době po jejich vzniku.

V období před nástupem mikroelektroniky byla informovanost o novinkách v technologii, konstrukci, nových prvcích atd. (i při soustavném rozvoji klasické radioelektroniky) vyhovující. S rozvojem mikroelektroniky a jejího přímého vlivu na modernizaci všech odvětví národního hospodářství se však stále zvyšují požadavky na informace z oblasti elektronických a mikroelektronických aplikací a technologií. Tato skutečnost je v publicistice známa a proto stejně jako jinde ve světě i u nás se venuje informacím o rozvoji elektroniky, mikroelektroniky a výpočetní techniky značná pozornost. Řada periodik, i když neuceleně, seznamuje své čtenáře s novými výrobky elektronického průmyslu či elektronikou ovládanými a řízenými exponaty na výstavách a veletrzích (často i nekvalifikovaně), s úspěchy ve výrobě výpočetní a digitální techniky, postupující automatizací a robotizací, s dohodami o spolupráci mezi podniky elektronického průmyslu u nás i se zahraničními partnery; o licencích či nových výzkumných a vývojových úkolech a jejich řešeních, jsou dostupné i údaje o nových součástkách i další technické, obecně zaměřené informace o použití mikroelektroniky v různých oborech – to vše, a to je podstatné, na úrovni všeobecných či populárních informací.

8. zasedání pléna ÚV KSČ k vědeckotechnickému rozvoji připomenulo, že soustavný zápas za zvyšování efektivnosti výroby na základě využití technického pokroku nelze nahradit agitací, osvětou či předpisy a administrativními nařízeními a upozornilo přitom na závažnou skutečnost, že řada zejména výzkumných a vývojových pracovišť řeší technické problémy obdobného i stejněho charakteru, což představuje značnou nehospodárnost.

A právě v oblasti elektroniky je téměř běžným jevem, že tyž obvodové celky (výpočetní, digitální, automatizační, výkonové, obvody čidél atj.) řeší u nás stovky pracovišť na různé profesionální úrovni (od družstevních po centrální podniky, ČSLA nevyjímaje) bez vzájemného bližšího kontaktu a vzájemného širokého výměny vhodných konstrukčních řešení.

Vzájemná neinformovanost pak vede často k dlouhým vývojovým lhůtám, ke konstrukcím zastaralým či netypickým (nebo s použitím těžko dostupných zahraničních součástek či stavebních dílů, protože se v návrhu využije obvodového řešení, převzatého ze zahraničního pramenu, což je doposud velmi častá praxe). Obtížné je pak i zajištění unifikace a tím i záměrnosti náhradních dílů těchto výrobků a to i při respektování platných norem. Typickým případem byl např. vývoj tzv. měřicích ústředen začátkem 70 let, kdy množství pracovišť řešilo jejich konstrukce s různou technickou úrovní od elektromechanických, přes tranzistorové až s použitím integrovaných obvodů (zatímco vyspělé státy je již začínaly řídit mikroprocesory). V současné době je obdobný stav v oblasti mini a mikropočítačů, ve vyvijených vzorcích jsou používány zahraniční součástky, jednotlivé systémy nejsou kompatibilní atd. (viz interview v AR A3/84).

Připojme-li k této problémům i výše zmíněný požadavek na průběžnou informovanost technických kádrů, spojenou s výchovou mladé generace pro práci s elektronickými obvody, zjistíme, že zcela chybí zdroj pravidelných technických informací, zaměřený na zveřejňování vybraných mikroelektronických konstrukcí a jejich aplikací v digitální a výpočetní technice.

Nahlédneme-li do seznamu současných v ČSSR vydávaných periodik, zabývajících se elektronikou (uveřejnil jej „Informační zpravodaj UTRIN“ příloha 7-8/83“), zjistíme, že v ČSSR není vydáván časopis s celostátní působností, určený širokému okruhu odborníků, který by se zabýval systematickou konstrukční obvodovou technikou mikroelektroniky, výpočetní techniky, digitálních i programovacích obvodů, programováním, automatizací a regulacemi systémy, periferními obvody procesorů a počítačů, snímači, čidly, zesilovacími výkonovými a polovodími obvody atd. Existují pouze specializované publikace určené úzkému okruhu profesionálních pracovníků příslušného oboru, vydávané ve velmi omezeném nákladu a bez možnosti zakoupení ve stáncích PNS. Elektronicky zaměřeným odborníkům pak nezbývá, než přejímat konstrukce a využívat zapojení pouze ze zahraničních, do této oblasti směrovaných časopisů.

Jediným periodikem, které svým nákladem 120 tisíc výtisků řady A měsíčně a 88 tisíc výtisků řady B 6x do roku řídí mezeru částečně využívá, je časopis Amatérské radio. Tím však, že jeho poslání určeno registraci přihlášek, má odlišný charakter (je zaměřeno na amatérskou radiotechniku a elektroniku), je toto suplování pro potřeby rozvoje mikroelektronizace v národním hospodářství nedostačující. Redakce si plně uvědomuje naléhavost informovanosti z nových oborů elektroniky, a proto alespoň části obsahu časopisu pokryvá stále rostoucí zájem o aplikace mikroelektroniky a výpočetní techniky.

Před dvěma roky byla proto v časopise zavedena rubrika „Mikroelektronika“, která vzbudila značný zájem a ohlas mezi čtenáři. Časopis se stal „podpůrným“ zbožím (PNS na celém území státu neprajíma další předplatitelské objednávky), což svědčí o zcela neuspokojeném poptávce odborné veřejnosti po těchto informacích, a navíc je odebíráni profesionálními pracovišti výzkumného, vývojového a konstrukčního charakteru, které jej využívají pro svou práci.

Lednové číslo časopisu (1982) přineslo rozhovor redakce s ministrem FMEP prof. ing. M. Kubátem, DrSc., ministrem spojů ing. V. Chaloupou, CSc., náčelníkem spojovacího vojska MNO genpor. ing. L. Stachem a dalšími předními pracovníky v elektronice o poslání a úkolech časopisu. Z diskuse jednoznačně vyplýnul rozpor mezi potřebami společnosti při rozvoji elektroniky, její popularizací a možnostmi časopisu co do rozsahu jeho obsahové náplně.

neboť začlenit všechny vyslovené požadavky do časopisu by znamenalo stránkový obsah příjemně šíří zdrojnosobit. Rozhovor také ukázal, že tento svazarmovský časopis, který má dnes již 32letou

historii (a 62letou jako Radioamatér) vždy byl a stále zůstává jedním z průkopníků rozvoje elektroniky v ČSSR.

Redakce si je plně vědoma uvedených skuteč-

ností, ale protože není v jejich silách provést kvantitativní změny, bude svoji pozornost na stránkách časopisu i nadále věnovat co nejvíce záběru elektronických aplikací.

Jak

REPRODUKTORY A REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

Dr. Ing. Aleš Boleslav, CSc., Ing. Mirčo Jončev

1. Úvod

Elektroakustické měniče představují velmi rozsáhlý a po stránce teoretické i praktické náročný obor, takže v této publikaci omezeného rozsahu, i když je zaměřena pouze na akustické zářiče, není možné se zabývat danou problematikou podrobně. Půjde zde o poskytnutí základních informací nutných pro návrh a konstrukci soustav pro reprodukci akustického signálu v uzavřených obytných místnostech. S ohledem na rozsah, který je k dispozici, budou uvedeny jen základní informace a vzorce nezbytné pro výpočet, bez důkazu a odvození, které by ovšem byly pro lepší porozumění problematice účelné.

Při návrhu akustických zářičů a při nezbytné početní kontrole jejich vlastností se neobejdeme bez výpočtu, stejně jako při vyčíslení výsledků měření. Tyto výpočty však v současné době, kdy jsou mezi techniky běžné elektronické kalkulačky (často programovatelné), jistě nebudou činit potíže.

Měřicí metody a postupy pro stanovení základních konstant reproduktorů a vlastností již hotových zářičů jsou navrženy tak, aby se daly uskutečnit minimálními prostředky. Vystačí se při nich převážnou většinou s tónovým generátorem (včetně výkonového zesilovače), elektronickým voltmetretem, případně s osciloskopem, odporovou dekádou a ovšem s měřicím mikrofonem, který v současné době není ani pro amatéra nedosažitelný. Jako měřicí mikrofon lze totiž s úspěchem použít elektretový mikrofon s integrovaným zesilovačem, který se používá v četných přenosných magnetofonech. Tyto mikrofony mívají obvykle velmi dobré přenosové vlastnosti v kmitočtovém rozsahu 30 až 5000 Hz, přičemž i v oblasti 5 až 10 kHz jsou odchyly od ideálního průběhu přijatelné. Je ovšem účelné srovnat si přenosové vlastnosti zvoleného mikrofonu s vlastnostmi kvalitního mikrofonu měřicího.

Ke zjišťování přenosových vlastností vyzářovacích jednotek je ovšem nutné mít k dispozici i potřebný měřicí prostor. Ale i zde lze mnohé improvizovat. Lze měřit totiž ve volném akustickém poli, kdy je vyzářovací jednotka vestavěna v okně laboratoře (viz kapitola 10) a vyzářuje do volného prostoru. Dále v oblasti nízkých kmitočtů lze využít možnosti, které skýtá měření v blízkém poli hlubokotónového

reproduktoru nebo vyzářovací jednotky, stejně jako měření v dostatečně utlumené místnosti, umístění se měřicí mikrofon do menší vzdálenosti od reproduktoru, než je její dozvuková vzdálenost.

V závěru práce jsou uvedeny základní informace o umístění reproduktorových soustav v místnosti a ovšem také o výkonu zesilovače, který je nezbytný pro vytvoření dobrého vjemu poslouchaného hudebního signálu. Umístění reproduktorových soustav je mimorádně důležité, zejména máme-li na zřeteli reprodukci signálů o nízkých kmitočtech, a to proto, že poloha zářiče v místnosti může ovlivnit hladinu zvuku o 12 dB i více a to i bez vlivu stojatých vln, který by se měl umístit v zářiče co nejvíce omezit (což je ovšem mnohdy velmi obtížné).

Pro úplnost je účelné zamyslit se nad oprávněností pojmu „vysoko kvalitní produkce“, krátce charakterizovaným symbolem Hi-Fi, který byl v současné době velmi podstatnou měrou degradován. V době zavedení tohoto pojmu se jednalo o kvalitní reprodukci, která měla vytvořit dojem přímého poslechu v optimálním místě koncertní síně. Oprávněnost tohoto pojmu se zvýšila zavedením stereofonie (prípadně kvadrofonie).

V současné době je pojmem kvalitní produkce znehodnocen převážnou měrou způsobem snímání signálu a jeho režijním zpracováním, neboť se zejména v oblasti tzv. „pop-music“ zavedla technika oddělených záznamů signálů jednotlivých hudebních nástrojů anebo skupin, stejně jako záznamu zpěvu jednotlivých sólistů, z nichž se výsledný snímek teprve dodatečně, často pracně, sestavuje. Mikrofony jsou při snímání signálů v těsné blízkosti zdrojů signálů, což ovšem často velmi zkresluje původní snímaný zvuk proti stavu, jaký je ve vzdáleném akustickém poli.

U tohoto druhu snímků se jedná o reprodukci snad představy hudebního režiséra, nikoli však o věrný zvuk.

Pokud jde o signál záměrně sestavený synteticky a také o synteticky vytvořený prostorový vjem, je věc vcelku přijatelná, protože se jedná o zvláštní záměr, svého času využitý při vytvoření takzvané „konkrétní hudby“. Neprůjatelně je, pokud se tato technika snímání a kompletace hudebního signálu přenáší i do oblasti záznamu tzv. vážné hudby, která vznikla v minulosti (a vzniká i v současné době), u níž je pro správný estetický účinek nezbytný vliv přirozeného dozvukového pole koncertní síně, stejně jako vliv určitého prostorového rozložení hudebních nástrojů a nástrojových skupin.

Bez ohledu na současný, často neutěšený stav snímací techniky je nutné řešit

reproduktořové soustavy včetně použitího elektronického zařízení tak, aby byly schopny vytvořit u posluchače při reprodukcii optimálně pořízeného snímku co nejlepší zvukový obraz blížící se představě autora díla, minimálně narušený technickými nedokonalostmi použitého zařízení. Přitom je nutno mít na zřeteli, že skutečný milovník dobré hudby spíše toleruje drobné nedostatky technického rázu, než hrubý zásah do struktury provozovaného díla; způsobený nevhodným způsobem snímání a nevhodnou hudební režíří.

2. Zdroje akustické energie a podstata jejich činnosti

Účelem reproduktoru, jakožto elektroakustického měniče, je přeměna elektrického signálu na odpovídající signál akustický, šířící se v plynném prostředí. Pro objasnění procesu přeměny elektrické energie na akustickou je účelné objasnit si, jak vzniká vlnění nesoucí akustickou energii a akustickou informaci.

Akustická energie, která je v kmitočtovém rozsahu 16 až 20 000 Hz uchem vnímána jako slyšitelný zvuk, vzniká rozmítním plynného prostředí, kterým se šíří. Pro vznik zvuku je charakteristický pulsující proud plynného prostředí (vzduchu) w , zvaný objemová rychlosť, daný součinem rychlosti v vzduchových molekulách a plochy S , kterou protéká. Platí tedy, že

$$w = Sv [m^3/s; m^2/m/s] \quad (2.1)$$

Tento proud vzduchu může být ovlivněn kmitajícím pevným tělesem, obklopeným plynným prostředím (například membránou), nebo kmitajícím sloupcem vzduchu souvisejícím s okolním vzduchem.

Akustický signál vznikne také, přivádí-li se do volného prostoru modulovaný proud vzduchu, jehož objemová rychlosť obsahuje periodickou střídavou složku.

Zdrojem akustického signálu konečně může být i horké těleso, jehož povrchová teplota periodicky kolísá.

Jedná se tedy o čtyři možné způsoby vybuzení (vzniku) akustického signálu, které mohou být aplikovány při konstrukci elektroakustických měničů.

Největší praktický význam má uspořádání zářiče, u něhož je akustický signál vyzářován kmitající membránou. Tento způsob vyzářování je aplikován jak u reproduktoru, u nichž membrána navazuje přímo na vnější okolí (u takzvaných reproduktoriů přímovyzářujících), tak u reproduktoru, u nichž souvisí membrána ob-

vykles kruhového tvaru s okolím přes rozšiřující se zvukovod exponenciální, hyperbolický nebo kuželový. Pohyb membráně uděluje elektromechanický měnič, v němž je elektrická energie měněna na mechanickou.

Zdroje akustického signálu, u nichž je signál vyzařován kmitajícími stěnami zářiče, jsou běžné v hudební praxi. Tako fungují například smyčcové i jiné strunné hudební nástroje, u nichž jsou kmitajícími strunami uváděny do pohybu jejich stěny nebo takzvaná rezonanční deska. Jedná se vesměs o zdroje akustické energie přímovyzářující.

Zářiče akustické energie, u nichž se využívá kmitajícího sloupce vzduchu, nelze využít u elektroakustických měničů. Jsou však běžné u píšťal a hudebních nástrojů fungujících jako píšťaly (flétna, pikola, zobcová flétna). Jedná se také o přímovyzářující jednotky, u nichž je akustický signál vyzařován převážně ústím, případně otvory nástroje.

Modulovaný proud vzduchu se uplatňuje u elektroakustických měničů pneumatických, u nichž je průtok vzduchu modulován elektricky ovládaným ventilem, který ovládá průřez, fungující jako proměnný akustický odpor. Veškerou potřebnou energii zde dodává proudící vzduch, elektrická energie pro ovládání ventilu je z hlediska celkové energetické bilance téměř zanedbatelná.

Elektroakustický zářič zmíněného druhu se obvykle řeší s ohledem na zvětšení účinnosti jako nepřímovyzářující.

Tímto způsobem bývají občas řešeny zářiče enormních výkonů určené pro ozvučení velkých oblastí. Byly však popsány i přímovyzářující pneumatické zářiče menších výkonů, vyznačující se neobyčejně malými rozměry. Zatím se však prakticky neuplatnily.

Určitou nevýhodou pneumatických měničů je poměrně značný základní tluk, způsobený proudícím vzduchem, jehož rychlosť musí být poměrně velká (nemá však překročit 1/10 rychlosti šíření zvuku).

V oboru hudebních nástrojů je však pneumatický zářič velmi rozšířen. Jako pneumatický přímovyzářující zářič pracují všechny plátkové hudební nástroje jako hoboj, klarinet, fagot, saxofon, a to ve všech používaných variantách. Patří sem i nástroje žestové, které jsou mimoto opatřeny ještě rozšiřujícím se zvukovodem, který zlepšuje jejich účinnost a tím se zvětšuje vyzářený akustický výkon.

Tepelné měniče, k nimž patří například také takzvaný „Poulseenův zpívající obrousek“ (přes stejnosměrný proud, který udržuje obrousek, je superponováno modulující střídavé napětí), byly v dřívějších letech využívány pro méně účely, pro absolutní cejchování mikrofonů. Měnič se

skládal z tenkého platinového vodiče (anebo fólie), protékajícího stejnosměrným proudem, který způsoboval změnu akustického tlaku v okolí vodiče. V pozdějších letech byl vynalezen ionofon, u něhož byl vyhřívaný drát nahrazen doutnavým výbojem v komůrce, na níž navazoval exponenciální zvukovod. Jednalo se o vysokotonový reproduktor s mimořádně vysokým horním mezním kmitočtem, kterého mohlo být dosaženo proto, že se jednalo o zářič bezmembránový, u něhož akustická energie vznikala přímo v dutině zvukovodu, v níž obsažený plyn měl velmi malou hmotnost i teplotnou setrvačnost.

V současné době byl znovu realizován obdobný typ iontového reproduktoru, který funguje jako přímovyzářující (bez zvukovodu). Jedná se však pouze o zajímavost bez praktického významu (vzhledem k jeho malé účinnosti).

Jak již bylo řečeno, největší praktický význam v současné době mají reproduktory využívající kmitající membrány a to přímovyzářující, které jsou nejčastěji používány, a reproduktory nepřímovyzářující a tlakové, používané jednak pro vyzařování velkých akustických výkonů, jednak pro řešení kvalitních a účinných vysokotonových jednotek. Těmito druhy reproduktoru se budeme v dalším zabývat.

3. Základní pojmy a vztahy

Úvodem je účelné objasnit si některé důležité základní pojmy a vztahy, které budou používány v dalším textu:

y	výchylka kmitajícího tělesa	[m, mm]	V	akustický odpor objemu	[Pa.s/m³]
$v = \omega y$	rychlosť kmitajícího tělesa	[m/s]	$c_{ak} = \frac{V}{p_{ak}}$	akustická poddajnost objemu	[m³/Pa]
$a = v\omega$	zrychlení	[m/s²]	$\lambda = \frac{c_0}{f}$	délka vlny akustického signálu	[m]
f	kmitočet, $\omega = 2\pi f$ kruhový kmitočet	[1/s]	$Q_s = \frac{(p_{a=0})}{p_s}$	činitel směrovosti zářiče	
S	plocha kmitajícího tělesa ve směru kolmém na výchylku	[m²]	$p_a = 0$	akustický tlak v ose zářiče	
$yS = V$	objemový posuv kmitající plochy	[m³]	$p^2_s = \int_0^\infty p^2_a da$	střední hodnota akustického tlaku	
$w = vS$	objemová rychlosť	[m³/s]	$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c_0}$	vlnové číslo	[1/m]
$\frac{dw}{dt}$	objemové urychlení	[m³/s²]	Q_0	činitel jakosti (jakost) naprázdno elektrodynamického reproduktoru	
$Z_m = \frac{F}{v}$	mechanická impedance	[Ns/m]	Q_{el}	elektrický činitel jakosti elektrodynamického reproduktoru (nakrátko)	
$F = am_m$	síla	[N]	Q_c	celkový činitel jakosti elektrodynamického reproduktoru (nakrátko)	
$p = \frac{F}{S}$	tlak	[Pa]			
c_0	rychlosť šíření zvuku (ve vzduchu při 20 °C $c = 345$ m/s)	[m/s]			
ρ	specifická hmotnost vzduchu	[kg/m³]			
p_0	statický tlak vzduchu (10^5 Pa)	[Pa]			
χ	Poissonova konstanta plynu ($\chi = 1,4$)				
$Z_{ak} = \frac{p}{w} = \frac{F}{vS^2} = \frac{Z_m}{S^2}$	akustická impedance uvažovaná na ploše S	[Pa.s/m³]			
$c_m = \frac{v}{F}$	mechanická poddajnost	[m/N]			
$c_{ak} = \frac{\Delta V}{p} = c_m S^2$	akustická poddajnost	[m³/Pa]			
m_m	mechanická hmotnost	[kg]			
$m_{ak} = \frac{m_m}{S^2}$	akustická hmotnost	[kg/m⁴]			
c_{op}	vlnový odpor vzduchu (415)	[Pa.s/m]			
r_m	mechanický odpor	[Ns/m]			

POZOR!

Vracíme se tímto k údajům v AR řady B, č. 1/1984 a to sice k mapě televizních vysílačů. Volali nám do redakce pracovníci vysílače na Pradědu, že v mapě je nesprávně uveden druh polarizace u jejich vysílače – jejich vysílač 1. programu používá nikoli vertikální, ale horizontální polarizaci. Stejně je tomu u vysílače Javorice (Jihlava).

4. AKUSTICKÉ ZÁŘÍČE

4.1 Bodový záříč

Nejjednodušším akustickým záříčem je bodový záříč, který je zdrojem objemové rychlosti w . Můžeme si jej představit jako pulsující kouli malých rozměrů, nebo konec tenké trubky, kterou vytéká plyn o střídavé objemové rychlosti

$$w = W \cos \omega t,$$

kde W je maximální objemová rychlosť, $\omega = 2\pi f$ kruhový kmitočet, f kmitočet a t čas.

Jedná se o přímovyzařující záříč, protože plyn s objemovou rychlosťí w se přímo stýká s vnějším obzduším.

Za bodový záříč můžeme považovat každý zdroj akustického signálu, jehož rozměry jsou malé proti délce vlny $\lambda = \frac{c_0}{f}$.

Tuto skutečnost je vhodné mít na zřeteli při všech úvahách o činnosti přímovyzařujícího záříče akustické energie v oblasti nízkých kmitočtů.

Akustická energie je vyzařována všemi směry. Akustický tlak ve volném prostoru ve vzdálenosti ξ od bodového zdroje je

$$p_{(4\pi)} = \rho \omega \frac{W}{4\pi \xi} [\text{Pa}, \text{kg/m}^3, \frac{1}{s}, \text{m}^3/\text{s}, \text{m}] \quad (4.1).$$

Ze vztahu je patrné, že se při konstantní objemové rychlosti zvětšuje akustický tlak přímo úměrně s kmitočtem, tedy $6 \text{ dB}/\text{oktáva}$. Při konstantním urychlení objemové rychlosti $dw/dt = \text{konst}$ je pak akustický tlak p kmitočtově nezávislý. To je další skutečnost, která charakterizuje činnost všech přímovyzařujících zdrojů akustického signálu v oblasti nízkých kmitočtů.

Máme-li na zřeteli, že intenzita akustické energie i ve volném akustickém poli je

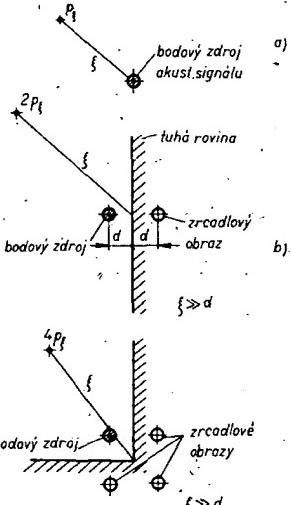
$$i = p v = \frac{p^2}{c \varrho} \quad (4.2),$$

je vyzařený akustický výkon zdroje

$$N_{\text{ak}(4\pi)} = \frac{p^2}{c \varrho} \frac{4\pi \xi^2}{4\pi} [\text{W}; \text{Pa}, \text{m/s}, \text{kg/m}^3, \text{m}] \quad (4.3),$$

nebo, je-li p akustický tlak ve vzdálenosti 1 m a $\xi = 1 \text{ m}$,

$$N_{\text{ak}(4\pi)} = \frac{p^2}{c \varrho} 4\pi \quad (4.4).$$



Obr. 4.1. Vliv okolí na vyzařování bodového zdroje; a) vyzařování do volného prostoru (do 4π), b) vyzařování do poloprostoru (do 2π), c) vyzařování do čtvrtprostoru (do π) (kvadrantu)

To platí pro uspořádání podle obr. 4.1a:

Je-li bodový zdroj objemové rychlosťi umístěn v těsné blízkosti nekonečné tuhé roviny (anebo přímo v této rovině), jak patrné z obr. 4.1b, a vyzářuje tedy do prostoru, je akustický tlak ve vzdálenosti ξ od zdroje

$$p_{(\xi \gg d)} = \rho \omega \frac{W}{2\pi \xi} \quad (4.5),$$

tedy dvojnásobný oproti prvnímu případu. Dvojnásobný je také vyzářený akustický výkon

$$N_{\text{ak}(2\pi)} = 2N_{\text{ak}(4\pi)} \quad (4.6).$$

Situaci si lze vyjádřit tak, že se současně s originálním zdrojem uplatňuje aktivně i jeho zrcadlový obraz, obr. 4.1b.

Analogický je případ u zdroje umístěného ve čtvrtprostoru, v blízkosti průsečíku dvou tuhých rovin (obr. 4.1c), kdy je energie vyžadována do úhlu π radiánů a

$$p_{(\xi \gg d)} = \rho \omega \frac{W}{\pi} = 4p_{(4\pi)} \quad (4.7)$$

a vyzářený výkon je čtyřnásobný ve srovnání s výkonom vyzářeným do volného prostoru. V tomto případě se jedná o uplatnění tří zrcadlových obrazů zdroje (4)

$$N_{\text{ak}(4\pi)} = 4N_{\text{ak}(4\pi)} \quad (4.8).$$

Podobná situace nastává u všech druhů záříčů, pokud jsou jejich rozměry malé ve srovnání s vlnovou délkou akustického signálu.

4.2 Pulsující koule

Teoreticky nejjednodušším záříčem akustické energie konečných rozměrů je pulsující koule, jejíž poloměr R se periodicky mění tak, že je radiální rychlosť v každého jejího povrchového bodu stejná. Je-li obvod záříče malý ve srovnání s délkou vlny λ

$$\frac{2\pi R}{\lambda} \ll 1 \quad (4.10),$$

je lze považovat kouli za bodový zdroj se všemi jeho vlastnostmi.

Povrch pulsující koule umístěné v plynném prostředí je zatížen akustickou impedancí

$$Z_v = \frac{c \varrho}{4\pi R^2} (A + jB) = \frac{c \varrho}{S} (A + jB) \quad (4.11),$$

jejíž složky A a B v závislosti na kmitočtu, popř. na $\frac{2\pi R}{\lambda} = kR$ jsou pátrné z grafu na obr. 4.2. Přitom:

$$A = \frac{(kR)^2}{1 + (kR)^2} \quad (4.12)$$

$$B = \frac{kR}{1 + (kR)^2} \quad (4.13)$$

(A a B jsou takzvané normované akustické impedance).

V oblasti nízkých kmitočtů, kdy $\frac{2\pi R}{\lambda} \ll 1$, je $A \approx (kR)^2$, zatímco imaginární složka má charakter reaktance hmotnosti m spolu kmitajícího vzduchu, kdy

$$m_v = \frac{\rho}{4\pi R} = 0.025 \frac{1}{\pi R}.$$

Při konstantní rychlosti radiálního kmitání povrchu záříče se akustický tlak v jeho okolí zvětšuje se směrnicí $6 \text{ dB}/\text{okt}$, tedy přímo úměrně s kmitočtem.

V oblasti kmitočtů, při nichž je délka vlny λ podstatně menší než obvod koule

$$\frac{2\pi R}{\lambda} > 1 \quad (4.14),$$

je akustický tlak ve vzdálenosti ξ od koule již kmitočtově nezávislý a je

$$p = c \varrho \frac{R}{\xi} v \quad (4.15).$$

Akustické pole je ovšem vždy kulové a záříč má činitel směrovosti $Q_s = 1$, nezávisle na kmitočtu.

Kulový záříč se používá zatím převážnou měrou jen pro měřicí účely. V poslední době však pracuje firma AUDAX na záříci ve formě části pulsující koule (kulovém vrchlíku), u něhož má být využit piezoelektricky aktivní polymer (polyvinylidenfluorid).

4.3 Membrána umístěna v nekonečné ozvučnici

Pístově kmitající membrána umístěna v nekonečné tuhé ozvučnici se chová v oblasti kmitočtů, kdy je její obvod menší než délka vlny, jako bodový zdroj, který vytvoří ve vzdálenosti ξ při objemové rychlosťi w akustický tlak

$$p = \rho \omega \frac{w}{2\pi \xi} \quad (4.5).$$

Je-li urychlení membrány a , je akustický tlak p kmitočtově nezávislý

$$p = \rho \frac{a S}{2\pi \xi} \quad (4.16),$$

což platí bez omezení (i pro délky vlny menší než obvod membrány). S rostoucím kmitočtem však vzrůstá činitel směrovosti z původní hodnoty 2 (do $\frac{2\pi R}{\lambda} \leq 1$) na

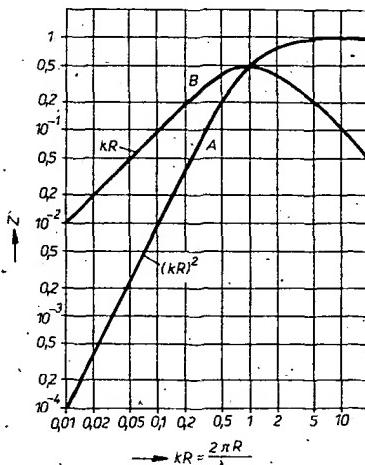
$$Q_s = \left(\frac{2\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (4.17),$$

jak je patrné z obr. 4.3. Z definice činitele směrovosti a vztahu (4.17) vyplývá, že se u pístové membrány kmitající s konstantním urychlením zmenšuje při kmitočtově nezávislé akustickém tlaku v její ose vyzářený výkon nepřímo úměrně s kmitočtem, a to u kmitočtů, při nichž je

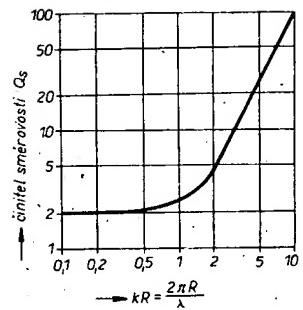
$$\frac{2\pi R}{\lambda} > 1.$$

Vrcholový úhel ψ směrové charakteristiky (obr. 4.4) je přibližně

$$\psi \approx 2 \arccos \left(1 - \frac{2}{Q_s} \right) \quad (4.18),$$



Obr. 4.2. Průběh složek normované vyzařovací impedance záříče fungujícího jako pulsující koule



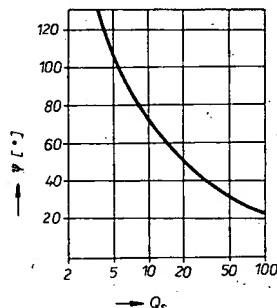
Obr. 4.3. Závislost činitele směrovosti pístové membrány umístěné v nekonečné rovině při vyzařování do poloprostoru na $(2\pi R/\lambda) = kR$

přičemž při odchylce $\psi/2$ od osy záříče se úroveň snižuje asi o 5 až 6 dB.

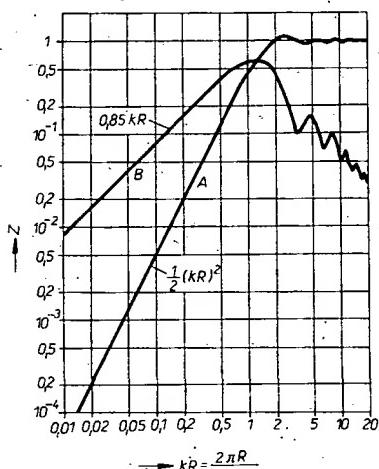
Přitom ve středu membrány je v oblasti nízkých kmitočtů akustický tlak

$$p_b = v_r \rho \omega R \quad (4.19)$$

Akustický tlak v ose membrány ve vzdálosti ξ vyjádřený tlakem v blízkém poli je tedy (při vyzařování do poloprostoru)



Obr. 4.4. Přibližná velikost vrcholového úhlu ψ v směrové charakteristiky pístové membrány umístěné v nekonečné rovině



Obr. 4.5. Průběh složek normované vyzařovací impedance jedné strany pístové membrány umístěné v nekonečné rovině při vyzařování do poloprostoru (2π)

$$p_\xi = p_b \frac{R}{2\xi} \quad (4.20)$$

Souvislosti mezi akustickým tlakem v blízkém a vzdáleném poli lze využít při měření reproduktorů v oblasti nízkých kmitočtů, jak bude uvedeno v kapitole o měření.

Mechanická vyzařovací impedance pístové membrány umístěné v tuhé rovině je

$$z_m = c_0 \rho S (A + jB) \quad (4.21)$$

a odpovídající akustická impedance

$$z_{ak} = \frac{c_0 \rho}{S} (A + jB) \quad (4.22)$$

Průběh složek A a B v závislosti na kmitočtu je na obr. 4.5.

Jak je patrné z grafu, blíží se reálná složka normované vyzařovací impedance v oblasti vysokých kmitočtů jedinice, zatímco hodnota B klesá k nule. V oblasti nízkých kmitočtů je

$$A = \frac{(kR)^2}{2} \quad (4.23)$$

a

$$B = \frac{8}{3\pi} \frac{2\pi R}{\lambda} = 0,85 \frac{R}{c_0} \omega \quad (4.24)$$

Imaginární složka vyzařovací impedance má charakter reaktance hmotnosti m_v spolu kmitajícího vzduchu, která je

$$m_v = \rho \cdot 0,85 \pi R^3 \quad (4.25)$$

což je hodnota mechanická a

$$m_{vak} = \rho \cdot 0,85 \frac{1}{\pi R} \quad (4.26)$$

což je hodnota akustická.

U membrány vestavěné v nekonečné ozvučníci jsou ovšem zatíženy obě její strany, takže celková hmotnost spolu kmitajícího vzduchu je pak dvojnásobná

$$m_{vak} = \rho \cdot 1,7 \frac{1}{\pi R} = \frac{0,65}{R} [\text{kg/m}^3; \text{m}] \quad (4.27)$$

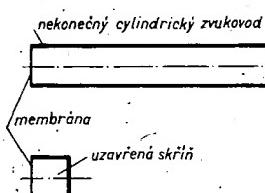
4.4 Membrána umístěna na konci cylindrického zvukovodu nebo ve stěně uzavřené skřínky

Membrána umístěna ve volném prostoru, jejíž zadní strana je zakryta a nevyzařuje do okolí (obr. 4.5), v oblasti nízkých kmitočtů, kdy je její obvod malý ve srovnání s vlnovou délkou vyzářeného

signálu ($\frac{2\pi R}{\lambda} \ll 1$), vyzařuje do celého

prostoru, podobně jako pulsující koule o stejné ploše. Činitel směrovosti je v tomto případě roven 1 a hodnota akustického tlaku ve vzdálenosti ξ od záříče odpovídá vztahu (4.1).

V oblasti vyšších kmitočtů, kdy $\frac{2\pi R}{\lambda} > 2$, se mění vyzařování z vše směrového na



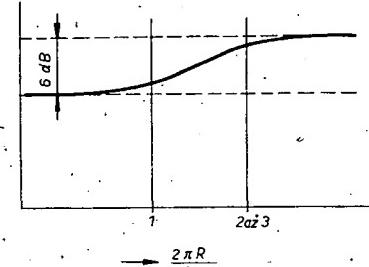
Obr. 4.6. Pístová membrána umístěna buď na konci nekonečného cylindrického zvukovodu anebo ve stěně uzavřené skřínky, vyzařující do celého prostoru (4π)

směrové a akustický tlak v ose membrány bude

$$p = \rho \omega \frac{w}{2\pi\xi} \quad (4.28)$$

přičemž směrové vlastnosti jsou obdobné jako u membrány umístěné v nekonečné ozvučníci.

Kmitá-li tedy pístová membrána konstantním urychlením v uspořádání podle obr. 4.6, je výsledná kmitočtová charakteristika v její ose kmitočtově závislá a má průběh podle obr. 4.7. Zlomy průběhu



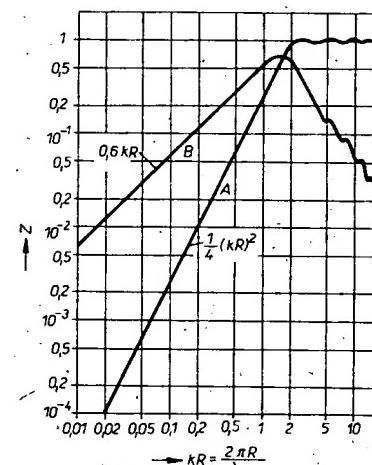
Obr. 4.7. Kmitočtový průběh akustického tlaku v ose pístové kmitající membrány, situované podle obr. 4.6

nastávají při kmitočtech, při nichž přechází kulová směrová charakteristika ve smě-

rovou, tedy $\frac{2\pi R}{\lambda} = 1$ a $\frac{2\pi R}{\lambda} = 2$ až 3. V oblasti vyšších kmitočtů ($\frac{2\pi R}{\lambda} > 2$ až 3) se

totíž membrána sama uplatňuje jako ozvučnice a chová se tedy přibližně jako pístová membrána umístěna v dostatečně rozumné ozvučníci.

Kmitočtový průběh složek vyzařovací impedance membrány umístěné na konci cylindrického zvukovodu je na obr. 4.8.



Obr. 4.8. Průběh složek normované vyzařovací impedance pístové kmitající membrány, umístěné na konci nekonečného zvukovodu anebo ve stěně uzavřené skřínky (viz obr. 4.6)

V oblasti nízkých kmitočtů ($\frac{2\pi R}{\lambda} < 1$) je

$$A = \frac{(kR)^2}{2} \quad (4.29)$$

a

$$B = \omega \cdot 0,6 \frac{R}{c_0} \quad (4.30)$$

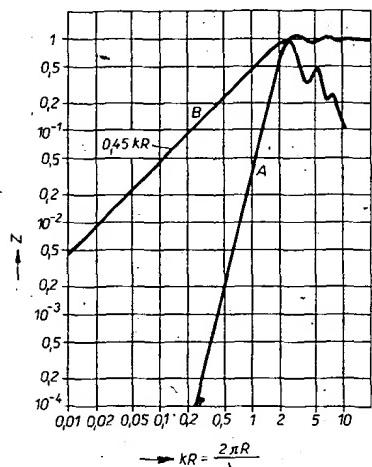
Hmotnost spolukmitajícího vzduchu tedy je $m_{vd, m} = \rho \cdot 0,6\pi R^3$ a její akustická hodnota

$$m_{ak} = \rho \cdot 0,6 \frac{1}{\pi R} \quad (4.31)$$

V oblasti vysokých kmitočtů ($\frac{2\pi R}{\lambda} < 1$) je vyzařovací impedance stejná jako u membrány umístěné v nekonečné ozvučnici, stejně jako hmotnost, která se zmenšuje k nule.

4.5 Membrána kmitající ve volném prostoru

Poslední typ jednoduchého zářiče akustického signálu s pistovou membránou je na obr. 4.9. Jedná se o membránu bez ozvučnice, kmitající ve směru své osy.



Obr. 4.9. Průběh složek normované vyzařovací impedance pistové kmitající membrány bez ozvučnice, uvažované na její jedné straně

Složky vyzařovací impedance zatěžující jednu stranu membrány odpovídají grafu na této obrázku.

Složka normované reálné vyzařovací impedance v oblasti nízkých kmitočtů je přibližně

$$A = \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^4 \cdot \frac{1}{40} \quad (4.32)$$

akustická hmotnost spolukmitajícího vzduchu platící pro celou membránu (obě její strany) je přitom

$$m_{ak} \approx 0,43 \rho \frac{1}{\pi R} = \frac{0,16}{R} [\text{kg/m}^4; \text{kg/m}^3] \quad (4.33)$$

(přibližně polovina spolukmitající hmotnosti vzduchu zatěžující jednu stranu pistové membrány, umístěné v nekonečné rovině).

Normovaná velikost reálné složky vyzařovací impedance volné membrány nabývá hodnoty 1 od kmitočtu $f = \frac{3c_0}{2\pi R}$. Do

tohoto kmitočtu stoupá osová kmitočtová charakteristika tohoto zářiče se směrnicí 6 dB/okt, aby v oblasti nad tímto kmitočtem byla kmitočtově nezávislá (pokud je urychlení membrány konstantní).

Tab. 1.

Umístění membrány	Vyzařování do	Úhel vyzařování	Činitel směrovosti	Složky normované vyzařovací impedance A B	Akustický tlak ve vzdálenosti r_d při objemové rychlosti zdroje w	Akustický tlak v difúzním poli
Na konci cylindrického zvukovodu anebo v malém pouzdru	plného prostoru	4π	1	$\frac{1}{4}(KR_a)^2$, $0,6KR_a$	$w \frac{1}{2} \frac{f_0}{\xi}$	$w \frac{1}{r_d} \frac{1}{2}$
V nekonečné rovině	poloprostoru	2π	2	$\frac{1}{2}(KR_a)^2$, $0,85KR_a$	$w \frac{f_0}{\xi}$	$w \frac{f_0}{r_d} \frac{1}{\sqrt{2}}$
V průsečíku dvou rovin	čtvrtprostoru (kvadrantu)	π	4	$(KR_a)^2$, $1,2KR_a$	$w 2 \frac{f_0}{\xi}$	$w \frac{f_0}{r_d} \cdot 1$
V průsečíku tří rovin	1/8 prostoru	$\pi/2$	8	$2(KR_a)^2$, $1,7KR_a$	$w 4 \frac{f_0}{\xi}$	$w \frac{f_0}{r_d} \cdot \sqrt{2}$

Plati pro $KR_a < 1$

Směrové charakteristiky tohoto typu zářiče mají do $f = 3c_0/2\pi R$ tvar osmičky, která se skládá ze dvou kružnic (jde o typický zářič prvního řádu). Se zvyšujícím se kmitočtem se osmička zužuje a směrovost zářiče vztahuje k růstu.

4.5.1 Vliv okolí na vyzařování pistové kmitající membrány [3]

Vyzařování zdrojů akustické energie (akustických zářičů) je do značné míry ovlivněno jejich okolím. To je patrné již z rozdílných vlastností pistových membrán nebo bodových zdrojů umístěných ve volném bezdovozvukovém prostoru a v blízkosti tuhé rovin, případně několika rovin. Pro osvětlení vlivu umístění zářiče v prostoru je sestavena tab. 1, v níž jsou u každého jednoduchého zářiče uvedeny reálné vyzařovací impedance, hmotnost spolukmitajícího vzduchu a akustický tlak ve vzdálenosti od zdroje signálu při dané objemové rychlosti w zářiče. Pro úplnost je uveden také činitel směrovosti, jehož velikost je třeba mít na zřeteli například při stanovení hladiny akustického tlaku, který vznikne v difúzním poli u uzavřeného prostoru, jsou-li rozměry tohoto prostoru dostatečně velké ve srovnání s vlnovou délkom signálu a je-li absorpcí jeho stěn dostatečná.

V posledním sloupci jsou pro informaci uvedeny akustické tlaky v difúzním poli u uzavřeného prostoru dostatečných rozdílů (rozumí se při kmitočtech, při nichž membrána vyzařuje jako bodový zdroj, tedy při $2\pi R/\lambda < 1$, je-li dozvuková vzdálenost uvažovaného prostoru r_d). Stejně vztahy platí i pro bodový zářič.

že se jeho ústí zatíží jeho charakteristikou impedancí (nejlépe vyzařovací impedance tohoto ústí u rozšiřujících se zvukovodů).

Nejjednodušším druhem zvukovodu je zvukovod válcový, jehož charakteristická impedance je

$$Z_{ak} = c_0 \rho / S \quad (4.34)$$

kde c_0 je rychlosť šíření zvuku, ρ specifická hmotnost vzduchu a S průřez zvukovodu. Tento druh zvukovodu se používá pouze pro přenos akustické energie například z membrány na vstup rozšiřujícího se zvukovodu.

Pro přizpůsobení větší impedance zdroje akustického signálu (například membrány) akustické impedance vzduchu je nutný zvukovod se zvětšujícím se průřezem, jehož výstupní průřez musí být volen tak, aby se vyzařovací impedance ústí blížila $\frac{c_0}{S}$. To může být splněno pouze tehdy, je-li $\frac{2\pi R_{vyst}}{\lambda} \rightarrow 1$, tedy když normovaná impedance průřezu ústí se blíží 1 – a to je kritérium pro volbu potřebné délky zvukovodu.

4.6.1 Exponenciální zvukovod

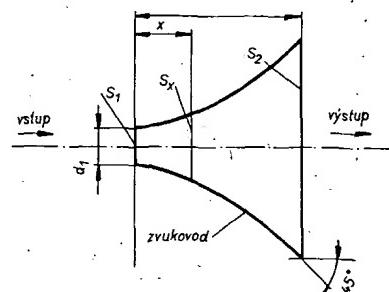
Průřez exponenciálního zvukovodu (obr. 4.10) v závislosti na pořadnici x uvažované od jeho vstupního průřezu S_1 je dán vztahem

$$S_x = S_1 e^{gx} \quad (4.35)$$

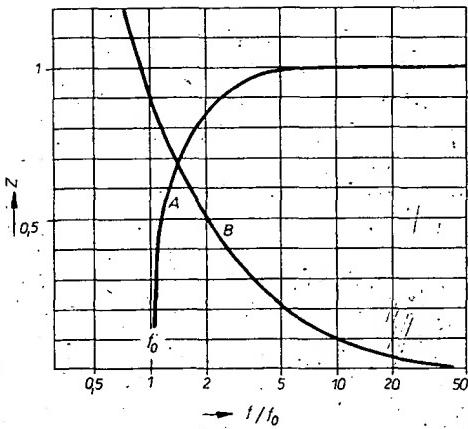
kde g je tzv. exponent zvukovodu.

Akustická vstupní impedance exponenciálního zvukovodu je dána výrazem

$$Z = \frac{c_0 \rho}{S} (A + jB)$$



Obr. 4.10. Rozšiřující se zvukovod vhodný pro přizpůsobení vyzařovací impedance pistové kmitající membrány na vnější ovzduší



Obr. 4.11. Průběh složek normovaných vstupních impedancí exponenciálního zvukovodu v závislosti na kmitočtu

Průběh složek A a B je patrný z grafu na obr. 4.11. Je-li f_0 kmitočet, při němž se $A \rightarrow 0$, platí, že

$$A = \sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2} \quad (4.36)$$

$$a \quad B = \frac{f_0}{f} \quad (4.37)$$

Přitom je kmitočet f_0 , tzv. kritický kmitočet zvukovodu, dán vztahem

$$f_0 = g \frac{c_0}{4\pi} \quad [\text{Hz}; 1/\text{m}; \text{m/s}] \quad (4.38)$$

Jak je patrné, je kritický kmitočet zvukovodu závislý pouze na jeho tvaru.

U zvukovodu konečné délky / je kmitočtový průběh jeho vstupní impedance zvlněný a to tím více, čím je l menší ve srovnání s délkou vlny λ . Je-li délka zvukovodu taková, že úhel rozevření zvukovodu je větší než 90° (tedy úhel $\alpha = 45^\circ$ – viz obr. 4.10), blíží se jeho vstupní impedance impedanci, jakou by měl nekonečně dlouhý zvukovod. K tomu dojde tehdy, je-li výstupní průměr zvukovodu

$$d_2 = \frac{4}{g} \quad \left[\text{m}; \frac{1}{\text{m}} \right] \quad (4.39)$$

Minimální délka zvukovodu pak je

$$l = \frac{1}{g} \ln \frac{S_2}{S_1} = \frac{2}{g} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (4.40)$$

4.6.2 Hyperbolický zvukovod

Plocha průřezu S_2 tohoto zvukovodu v závislosti na vzdálenosti x od jeho vstupu je dána rovnicí

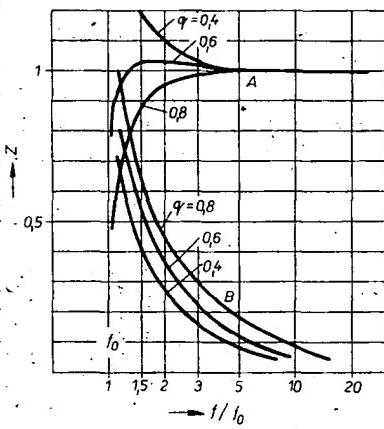
$$S = S_1 \left(\cosh \frac{gx}{2} + q \sinh \frac{gx}{2} \right)^2 \quad (4.41)$$

Při konstantě $q < 1$ je délka / tohoto zvukovodu menší než délka exponenciálního zvukovodu. Výstupní průřez zvukovodu S_2 je ovšem stejný jako u zvukovodu exponenciálního.

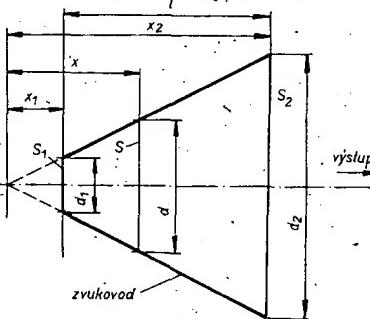
Další předností tohoto zvukovodu je to, že jeho vstupní impedance dosáhne jmenovité velikosti při podstatně nižším kmitočtu, než u zvukovodu exponenciálního (viz obr. 4.12).

4.6.3 Kuželový zvukovod

Nejjednodušší druh zvukovodu co do tvaru je zvukovod kuželový, který však ze



Obr. 4.12. Průběh složek normovaných vstupních impedancí hyperbolického zvukovodu v závislosti na kmitočtu pro různé hodnoty konstanty q .



Obr. 4.13. Kuželový zvukovod

všech doposud popsaných druhů vychází nejdéleší. Jeho základní uspořádání je patrné z obr. 4.13.

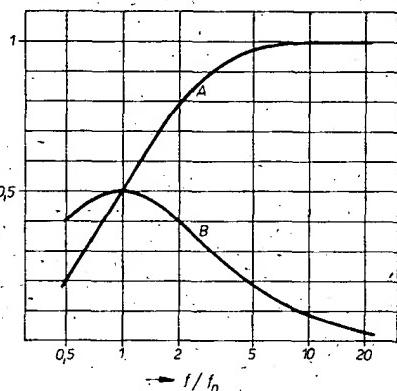
Plocha průřezu S zvukovodu v místě x je

$$S = \left(\frac{x^2}{x_1} \right) S_1, \quad (4.42)$$

Při kmitočtu $f_0 = \frac{c_0}{2\pi x_1}$ je absolutní hodnota vstupní normované impedance rovna

$$\frac{1}{\sqrt{2}}$$

Průběh normovaných hodnot vstupní impedance zvukovodu v závislosti na kmitočtu je patrný z obr. 4.14. Protože průměr vstupního průřezu zvukovodu má byt $d_2 = l$, a z toho $d_2 = 2x_1$, je potřebná délka zvukovodu



Obr. 4.14. Průběh složek normovaných vstupních impedancí kuželového zvukovodu v závislosti na kmitočtu

$$I = \frac{c_0}{2\pi f_0} \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right) \quad (4.43)$$

Vrcholový úhel směrové charakteristiky se v oblasti vyšších kmitočtů blíží vrcholovému úhlu zvukovodu.

4.7 Zhodnocení základních typů akustických zářičů

Největší praktický význam pro využívání jednotky určené pro kvalitní produkci akustického signálu v bytových prostorách mají přímo využívající měniče a to především pro oblast signálů o nízkých a středních kmitočtech. Jejich přednosti jsou jejich relativně malé rozměry.

Vysokotónové zářice se řeší částečně jako přímo využívající (velmi často s membránami ve tvaru kulového vrchlíku), ale také jako nepřímo využívající, případně tlakové.

Vedle klasicky řešených měničů se začínají uplatňovat reproduktory piezoelektrické a elektrodynamické páskové, případně elektrodynamické s plohou cívky, napařenou na tenké membráně, zhotovené z tenké nevodivé fólie. Nutno se zmínit také o piezoelektrických měničích, v nichž je použita membrána zhotovená z piezoelektricky aktivní fólie z polyvinylidenufluoridu, jejichž vývojem se zabývá několik významných firem.

5. Druhy reproduktorů, jejich funkce a vlastnosti

Reproduktoře lze rozdělit podle způsobu využívání na dva základní druhy a to přímo využívající a nepřímo využívající.

U přímo využívajících reproduktorů, které představují v podstatě některé ze základních měničů, o nichž byla řeč v kapitole 4, navazuje jejich membrána bezprostředně na prostředí, do něhož je akustická energie využívána. Tyto reproduktory mají obvykle malou účinnost, nepřekračující několik desetek procent.

U nepřímo využívajících reproduktorů je vložen mezi kmitající membránu elektroakustického měniče a prostředí zvukovod, případně doplněny pomocnými akustickými obvody, umožňující zvětšení zatížení membrány využívací impedance. Účinnost těchto reproduktorů může dosáhnout i několika desítek procent, obvykle však v menším kmitočtovém rozsahu.

Jako přímo využívající, případně nepřímo využívající reproduktory mohou působit i měniče bezmembránové, například pneumatické, anebo tepelné. U pneumatického měniče nese energii proud vzduchu, jehož průtoková rychlosť je modulována. U tepelného měniče akustický rozruch vzniká přívodem tepelné energie, která způsobuje v daném prostoru objemové změny vzduchu ovlivňující objemovou rychlosť vzduchu pravidelného z prostoru měniče. Typickým měničem tohoto druhu je například ionofon [8].

V současné době mají největší praktický význam reproduktory elektrodynamické, cívkové, přímo i nepřímo využívající, menší pak elektrodynamické páskové, v poslední době jejich varianta v provedení s plohou cívky, dále velkoploché reproduktory elektrostatické (největší význam v této oblasti mají reproduktory firmy QUAD) a konečně neobvyklejší záj-

mavé a důmyslně řešené reproduktory piezoelektrické firmy MOTOROLA.

Základní pojmy týkající se reproduktoru jsou uvedeny v úvodní části ČSN 36 8261 až 36 8263. Pro úplnost jsou zde zopakovány nejdůležitější z nich, které v dalším textu budou používány:

Akustická osa reproduktoru je u osové symetrických reproduktorů shodná s jejich geometrickou osou (u kruhových a eliptických reproduktorů prochází středem membrány a je na ni kolmá). U speciálních reproduktorů ji určuje zpravidla výrobce.

Ústí reproduktoru je plocha, z níž vystupuje při činnosti reproduktoru akustická vlna. U přímovyzařujících reproduktorů je to rovina proložená účinnou plochou membrány, případně jejími okraji, u nepřímovyzařujícího reproduktoru je to výstupní plocha zvukovodu, která může být i zakřivená.

Referenční bod reproduktoru je průsečík akustické osy reproduktoru s plochou ústí reproduktoru.

Jmenovitá Impedance reproduktoru je nejmenší absolutní velikost jeho vstupní elektrické impedance v pásmu kmitočtů, pro něž je určen.

Standardní příkon se určí z přípustného efektivního napětí U na svorkách reproduktoru a činného odporu, rovného co do velikosti absolutní hodnotě jmenovité impedance Z , reproduktoru.

Je dán vztahem $P = U^2/Z$.

Charakteristická citlivost reproduktoru je průměrná hodnota efektivního akustického tlaku v daném kmitočtovém pásmu (obvykle 250 až 4000 Hz) v akustické ose reproduktoru, měřená ve vzdálenosti 1 m od jeho referenčního bodu, při vyzářování do volného prostoru a standardním příkonu 1 VA. Vyjadřuje se v Pa nebo v hladině charakteristické citlivosti nad referenční hladinou 20 μ Pa. Udává se obvykle u reproduktoru umístěného ve standardní deskové ozvučnici.

Rezonanční kmitočet reproduktoru je nejnižší rezonanční kmitočet reproduktoru, při němž nabývá jeho vstupní impedance maximální velikost. Udává se obvykle u elektrodynamicických přímovyzařujících reproduktorů.

Kmitočková charakteristika reproduktoru je závislost hladiny akustického tlaku v určitém definovaném bodě před reproduktorem, při konstantním napětí na jeho svorkách, znázorněna obvykle grafem v ortogonálních souřadnicích. Udává se obvykle pro bod v ose reproduktoru a body v různých směrech, odchýlených od této osy.

U přímovyzařujících reproduktorů se obvykle udává při jejich umístění ve standardní anebo nekonvenčné ozvučnici (při vyzářování do poloprostoru).

Směrová charakteristika reproduktoru je závislost akustického tlaku před reproduktorem na úhlu, který svírá spojnice referenčního bodu reproduktoru a bodu, v němž je měřen akustický tlak, s osou reproduktoru, při daném kmitočtu a příkonu a stálé vzdálenosti od referenčního bodu.

Akustický výkon reproduktoru je celkový vyzářený akustický výkon reproduktoru při dané konstelaci reproduktoru (při vyzářování do poloprostoru anebo plného prostoru) a daném příkonu.

Standardní účinnost reproduktoru je poměr celkového vyzářeného akustického výkonu reproduktoru k jeho standardnímu příkonu.

Činitel směrovosti reproduktoru (Q_s) je poměr vypočteného akustického výkonu reproduktoru pro případ všeobecného vyzářování, při němž se vychází z akustického výkonu měřeného v jeho ose, ke skutečnému vyzářenému akustickému výkonu.

Index směrovosti reproduktoru je činitel směrovosti vyjádřený v decibelech ($= 10 \log Q_s$).

Činitel harmonického zkreslení reproduktoru je poměr efektivní hodnoty akustického tlaku všech harmonických složek, počínaje rámem 2, k průměrné hodnotě první harmonické složky uvažované v daném kmitočtovém pásmu reproduktoru.

Činitel harmonického zkreslení se uvádí buď v procentech anebo v dB.

Subharmonické tóny jsou signály o kmitočtu f/n ($n = 2, 3, 4 \dots$), kdy f je kmitočet budicího elektrického signálu přivedeného na svorky reproduktoru.

Pazvuky jsou nežádoucí složky ve výstupním akustickém signálu sluchem snadno postrěhnutelné, které mají obvykle charakter nelineárního zkreslení harmonickými složkami vyšších řad, projevující se jako drnčení a šestiny.

5.1 Přímovyzařující reproduktory

V současné době je při konstrukci běžných vyzářujících jednotek nejčastěji používán přímovyzařující reproduktor s elektrodynamickým elektromechanic kým méněm. Akustická energie je vyzářována membránou, která v oblasti nízkých a částečně i středních kmitočtů kmití přibližně plošně. Jedná se v principu o jeden ze základních typů elektroakustických zářičí. Vzhledem k tomu, že akustická impedance kmitacího systému reproduktoru (daná v oblasti vyšších kmitočtů reaktanci jeho hmotnosti) je podstatně větší než jeho vyzářovací impedance, je účinnost elektrodynamicických přímovyzařujících reproduktorů poměrně malá a mimo jejich základní rezonanční nepřekročí několik desetin procent (zřídka několik procent).

Nesporu předností elektrodynamicických přímovyzařujících reproduktorů jsou jejich malé rozměry ve srovnání s délkou vlny vyzářeného akustického signálu, jejich jednoduchost, malá náročnost na údržbu a spolehlivost (pokud ovšem nejsou neúnosně přetěžovány).

Podstatnou částí elektrodynamického reproduktoru je jeho membrána, pevně spojená s formerem, nesoucím kmitací cívku, která tvoří ve spojení s radiálním magnetickým polem v mezeře magnetického obvodu elektromechanic kým méně, způsobující axiální pohyb membrány. Schematický nákres elektrodynamicického reproduktoru běžného typu je na obr. 5.1. Jedná se o reproduktor hlubokotónový, středotónový, nebo reproduktor, určený pro přenos celého akustického spektra signálů.

Membrána, která má obvykle tvar přibližně kuželové anebo nerozvinutelné plochy podobného tvaru, bývá zhotovena z papírové hmoty, která má při malé

specifické hmotnosti dostatečnou tuhost a velké vnitřní tlumení, omezující vznik nežádoucích parazitních kmitů. Membrána musí být řešena tak, aby v co nejširší kmitočtové oblasti kmitala plošně. V současné době existují také membrány z tuhých pěnových anebo jinak lehčených materiálů (polymerů i kovů), voštínové membrány a jiné, které se však používají zatím jen v omezeném měřítku. Přenos, který tato nová provedení membrán představují, zatím neodpovídá jejich značné ceně.

Membrána je na svém obvodu opatřena poddajným okrajem, který dovoluje její osou výchylku (která musí být u hlubokotónových reproduktorů při větších výkonech značná) a současně udržuje membránu v centrální poloze. U hlubokotónových reproduktorů a i některých středotónových bývá poddajný okraj zhotoven z pryžové fólie, vrstvy pěnového materiálu, impregnovaného plátna apod. Důležité je, aby byl pokud možno neprodyšný. U ostatních reproduktorů tvorí okraj zeslabená část membrány. Aby se odstranily nežádoucí parazitní kmity vlnek, bývají u některých typů reproduktorů tlumeny vhodným náterem anebo vrstvou materiálu, který absorbuje vibrace.

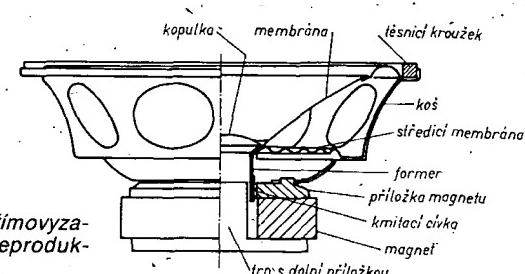
Na střední zúžené části membrány je připojen válcový former, nesoucí kmitací cívku, umístěnou v mezeře magnetického obvodu. Tento former bývá obvykle zhotoven z izolantu (nejčastěji impregnovaného papíru). U reproduktorů větších výkonů se používá také hliníkový former, který musí být ovšem přerušen mezerou, aby nepůsobil jako závit nakrátko. Tento former odvádí teplo vznikající v kmitací cívce. Aby se mohl lépe vyzářit, bývá někdy opatřen chladicími žebry. Konstrukci kmitací cívky je omezena maximální přípustným elektrickým budicím výkonem.

Kmitací cívka musí mít takovou délku, aby se délka vodiče správně magnetickým polem s výchylkou membrány měnila co nejméně. Proto bývá cívka u hlubokotónových reproduktorů značně delší než přiložka magnetického obvodu, což má za následek zmenšení dosažitelné citlivosti. (Část cívky totiž zůstává neaktivní a odpovídá této neaktivní části neužívané zvětšuje celkový odpor cívky).

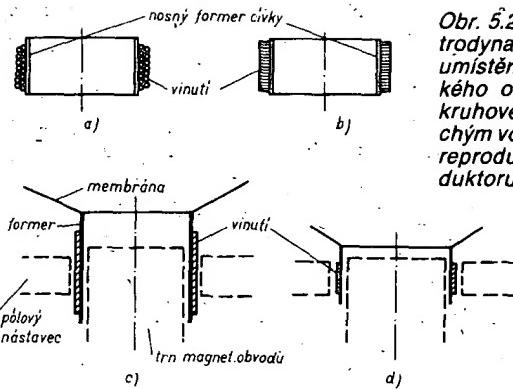
V místě spojení membrány s formerem je umístěn poddajný středící prvek, který umožňuje axiální pohyb membrány a znešší kmitací cívce. Tímto středícím prvkem bývá u moderních reproduktorů obvykle středící membrána.

Membrána je s magnetickým obvodem, u něhož se v současné době používají převážně feritové magnety, spojena plechovým nebo litým košem, opatřeným dostatečně velkými otvory. Tento koš je obvyklý u reproduktorů hlubokotónových, středotónových a reproduktorů určených pro přenos celého akustického pásma.

Kmitací cívka je umístěna ve vzduchové mezeře magnetického obvodu (ve tvaru mezikruží), v níž je vytvořeno radiální magnetické pole o sycení B , protínající kolmo vodiče kmitací cívky. Pro činnost



Obr. 5.1. Schematický nákres přímovyzařujícího elektrodynamicického reproduktoru



Obr. 5.2. Provedení kmitacích cívek elektrodynamicických reproduktorů a jejich umístění ve vzduchové mezere magnetického obvodu; a) cívka vinutá vodičem kruhového průřezu, b) cívka vinutá plochým vodičem, c) cívka hlubokotónového reproduktoru, d) cívka běžného reproduktoru a reproduktoru středu a vysokotónových

reprodukторu je rozhodující velikost součinu délky vodiče a sycení B (údaj B_l).

Kmitací cívka je obvykle vinuta měďným lakovaným drátem a to ve dvou vrstvách (obr. 5.2a). U speciálních reproduktorů, u nichž je požadována velká citlivost, bývá použito v některých případech vinutí z hliníkového drátu. Aby se lépe využilo prostoru ve vzduchové mezere magnetického pole, lze cívku navinout vodičem obdélníkovitého průřezu podle obr. 5.2b. U vysokotónových reproduktorů bývá často kmitací cívka s ohledem na její nezbytnou malou hmotnost pouze jednovrstvová.

Je-li kmitací cívka o odporu R_v protékána proudem i , působí na ni a membránu síla

$$F = B_l i \quad [N; T, m, A] \quad (5.1)$$

kde l je délka vodiče, který se nachází v magnetickém poli. Veličina B_l je jednou ze základních veličin, které charakterizují vlastnosti reproduktoru.

Pro vlastnosti reproduktoru je dále rozhodující aktívni plocha S_{akt} membrány, kterou lze přibližně stanovit z vnějšího a vnitřního průměru poddajného okraje membrány podle vztahu

$$D_{akt} = (D_1 + D_2)/2 \quad (5.2)$$

$$S_{akt} = \frac{\pi}{4} D_{akt}^2 \quad (5.3)$$

a obr. 5.3.

Významná je také velikost poddajnosti c , uložení kmitacího systému reproduktoru, která však bývá dosud proměnná, stejně jako jeho rezonanční kmitočet. Poddajnost uložení se obvykle udává jako ekvivalentní objem V_{ekv} o stejně akustické poddajnosti, pro něž platí

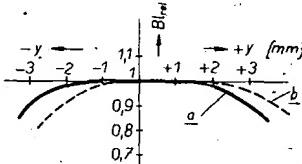
$$V_{ekv} = \rho_{akt} c_{1ak} = C_{1ak}^2 c_{1ak} = 1,4 \cdot 10^5 c_{1ak} \quad [m^3; m^3/Pa] \quad (5.4)$$

Pro posouzení vlastnosti reproduktoru jsou dále důležité hmotnost jeho kmitacího systému m , mechanické ztráty, vznikající při jeho kmitání, charakterizované ztrátovým odporem r , a elektrická impedance reproduktoru při jeho rezonančním kmitočtu.

Velikost vyzářeného akustického výkonu reproduktoru je omezena možnou amplitudou membrány a přípustnou elektrickou zatížitelností kmitací cívky (omezenou jejím oteplením).

Při činnosti reproduktoru je nutné, aby konstanta B_l byla minimálně závislá na

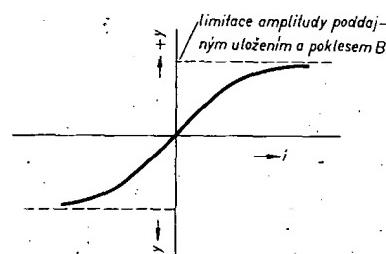
amplitudě membrány a aby se zmenšovala v závislosti na této amplitudě symetricky vůči klidové poloze (obr. 5.4). Nesy-



Obr. 5.4. Závislost konstanty B_l na výchylce membrány; a) správný průběh závislosti $B_l = f(y)$; b) nevhodný průběh B_l na amplitudě, způsobený nesprávnou montáží membrány

metrický tvar průběhu $B_l = f(y)$ znamená, že klidová poloha kmitacího systému je nesprávná, což může být způsobeno při montáži anebo dodatečnou deformaci střednic membrány či poddajných vlnek.

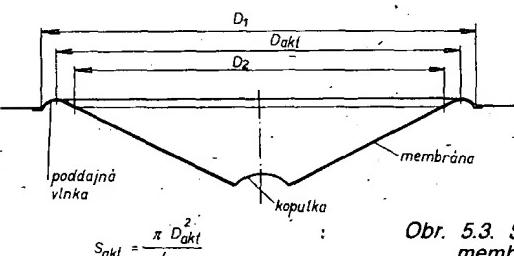
Rovněž tak má být symetrická závislost mezi výchylkou membrány a silou na ni působící (obr. 5.5) vzhledem ke klidové



Obr. 5.5. Závislost amplitudy na proudu protékajícím vinutím kmitací cívky (u kvádratního reproduktoru)

poloze membrány. Z hlediska správné činnosti reproduktoru má s ohledem na vznikající zkreslení větší význam závislost $B_l = f(y)$ než závislost podle obr. 5.5 ($y = f(i)$).

Jak již bylo uvedeno, je poddajnost uložení kmitacího systému hodnota značně nestálá, stejně jako rezonanční kmitočet f_r . Poddajnost c bývá u nového reproduktoru znacně menší než u reproduktoru, který je již delší dobu v provozu. Je dále závislá na amplitudě membrány. Na tyto skutečnosti nutno brát ohled při aplikaci



Obr. 5.3. Stanovení aktívniho průměru membrány a její aktívni plochy

reproduktoru. Proto není účelné vázat se příliš při návrhu ozvučnice na značně neurčitou velikost poddajnosti kmitacího systému.

Jednotlivými základními prvky reproduktoru, o nichž zde byla řeč, jsou charakterizovány jeho hlavní vlastnosti, to je jeho citlivost, kmitočtový průběh, do jisté míry i velikost nelineárního zkreslení, maximální vyzářitelný akustický výkon a jeho použitelnost ve spojení s ozvučnicí.

Jak vyplýnulo z uvedeného, pro posouzení vlastnosti reproduktoru a jeho použitelnosti jsou důležité tyto veličiny:

1. Aktívni plocha S_{akt} membrány [m^2],
2. Hmotnost kmitacího systému (mechanická anebo akustická)

$$m_{1ak} = \frac{m_{1mech}}{S_{akt}^2} \quad [\text{kg}/\text{m}^4]$$

3. Veličina B_l anebo B_l/S_{akt} [$T \cdot m; T/m$],

4. Odpor R_v vinutí kmitací cívky [Ω],

5. Jmenovitá impedance Z_n [Ω],

6. Maximální použitelná amplituda membrány omezená zmenšením B_l vlivem výchylky, y_{max} , případně max. objemový pošuv $\Delta V = y_{max} S_{akt}$ membrány, poddajnost kmitacího systému $C_{1ak} = C_{1max} S_{akt}^2$, nebo

7. Ekvivalentní objem V_{ekv} [m^3], případně rezonanční kmitočet f_{rez} [Hz], kmitočtový průběh s udáním dolního a horního mezního kmitočtu,

8. Charakteristická citlivost η [$\text{Pa}/\text{VA}/\text{m}$] nebo [$\text{dB}/\text{VA}/\text{m}$],

9. Nelineární zkreslení;

10. Směrové charakteristiky,

11. Činitele jakosti Q_o , Q_{el} , Q_c při rezonančním kmitočtu

Poznámka. U reproduktoru je nutno uvažovat dvě různé citlivosti, a to citlivost definovanou podle ČSN, při níž se vychází z průměrné hodiny akustického tlaku uvažované obvykle v kmitočtové oblasti 250 až 4000 Hz, a citlivosti, která se uplatňuje v oblasti pistového pohybu membrány, kterou lze vypočítat ze základních konstant reproduktoru. Rozdíl mezi oběma citlivostmi, který závisí na způsobu kmitání membrány v oblasti vyšších kmitočtů, ne-přesahuje obvykle 1 až 3 dB.

Znalost všech uvedených veličin je nezbytná u hlubokotónových reproduktorů a reproduktorů určených pro přenos celého akustického pásmá, má-li být pro reproduktoru navržena ozvučnice.

Z uvedených veličin se běžně uvádějí pouze údaje jmenovité impedance, jmenovitého příkonu, rezonančního kmitočtu a občas citlivost a přenášené kmitočtové pásmo. Pouze někteří opravdu seriální výrobci uvádějí všecké potřebné údaje, doplněné případně i údaji činitelů jakosti reproduktoru.

Údaje všech uvedených veličin není ovšem třeba uvádět, protože mnohé z nich jsou na sobě závislé a lze je snadno z ostatních odvodit.

V dalším jsou uvedeny vztahy, z nichž jsou patrné definice jednotlivých vlastností a údajů a jejich vzájemný převoz. Rezonanční kmitočet reproduktoru:

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{m_{1ak} C_1}} \quad [\text{Hz}] \quad (5.5)$$

Elektrický činitel jakosti reproduktoru:

$$Q_{el} = \frac{2\pi f_{rez} m_{1ak} R_v}{(B_l/S_{akt})^2}$$

$$[-; \text{Hz}, \text{kg}/\text{m}^4, \Omega, \text{Tm}, \text{m}^2] \quad (5.6)$$

Celkový činitel jakosti reproduktoru:

$$Q_c = Q_{el} \frac{Z_{rez} - R_v}{Z_{rez}} = (Q_{el} Q_o) / (Q_{el} + Q_o) \quad (5.7)$$

kde Z_{rez} je impedance reproduktoru při

rezonančním kmitočtu. Činitel jakosti reproduktoru naprázdnou:

$$Q_0 = \frac{2\pi f_{\text{rez}} m_{\text{1ak}}}{(B/S)^2} (Z_{\text{rez}} - R_v) \quad [~; \text{Hz}, \text{kg}/\text{m}^4, \Omega, \text{T}/\text{m}] \quad (5.8)$$

Citlivost reproduktoru v nadrezonanční oblasti:

$$\eta = \frac{\rho}{2\pi\sqrt{R_v}} \frac{BI}{S} \frac{1}{m_{\text{1ak}}} \quad [\text{Pa}/\sqrt{\text{VA}}/\text{m}; \text{Tm}, \text{m}^2, \text{kg}/\text{m}^4] \quad (5.9)$$

Citlivost reproduktoru:

$$\eta = 52,1 + 10 \log \frac{f_{\text{rez}} V_{\text{ekv}}}{Q_{\text{el}}} \quad [\text{dB}/\sqrt{\text{VA}}/\text{m}; \text{Hz}, \text{m}^3, -] \quad (5.10)$$

$$\eta [\text{dB}] = 87,6 + 10 \log \frac{f_{\text{rez}}}{Q_{\text{el}} m_{\text{1ak}}} \quad (5.11)$$

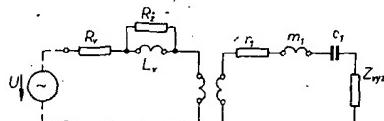
Kmitočtový průběh reproduktoru umístěného v nekonečné ozvučnici, jakož i citlivost a kmitočtový průběh amplitudy membrány lze určit z ekvivalentního schématu [1], [2], [3] (podle obr. 5.6), nebo jeho zjednodušené varianty (podle obr. 5.7). Pro úplnost je na obr. 5.8 elektrické náhradní schéma reproduktoru.

Kmitočtový průběh akustického tlaku v ose reproduktoru umístěného v rozléhlé deskové ozvučnici ve vzdálenosti ξ od jejího ústí je dán vztahem

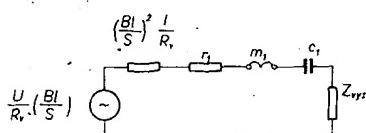
$$p = \eta \frac{1}{\xi} \frac{q^2}{|q^2 - 1 + j\frac{q}{Q_c}|} \quad (5.12)$$

kde $q = f/f_{\text{rez}}$ (5.13) .

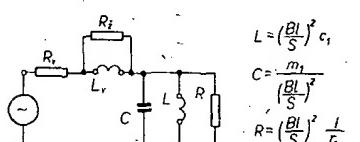
Vztah (5.12) platí za předpokladu, že membrána kmitá pístově, což je splněno v oblasti nízkých, příp. středních kmitočtů (podle druhu reproduktoru).



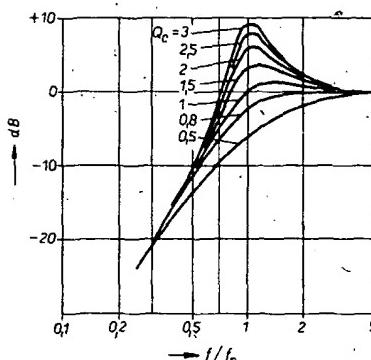
Obr. 5.6. Úplné ekvivalentní schéma elektrodynamického přímovyzařujícího reproduktoru



Obr. 5.7. Zjednodušené ekvivalentní schéma elektrodynamického přímovyzařujícího reproduktoru



Obr. 5.8. Elektrické náhradní schéma elektrodynamického přímovyzařujícího reproduktoru



Obr. 5.9. Kmitočtové průběhy přímovyzařujícího elektrodynamického reproduktoru, umístěného v nekonečné ozvučnici, pro různé celkové činitele kvality Q_c

Na obr. 5.9 je soustava kmitočtových průběhů reproduktoru pro různé činitele kvality Q_c . Nejpříznivější průběh se získá při Q_c v rozmezí 0,8 až 1. V podrezonanční oblasti stoupá kmitočtový průběh se směrnicí 12 dB/okt, v nadrezonanční oblasti, kdy je pohyb kmitacího systému řízen reaktancí jeho hmotnosti (jeho urychlení je konstantní), je kmitočtově nezávislý.

Výklopy membrány reproduktoru je při daném akustickém tlaku p ve vzdálosti ξ od ústí reproduktoru dána vztahem

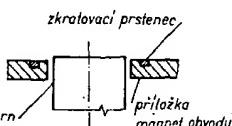
$$y = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi\rho}} \frac{1}{S} \frac{1}{\bar{P}} \frac{1}{f_{\text{rez}}} \frac{1}{|(q^2 - 1) - j\frac{q}{Q_c}|} \quad (5.14)$$

$$\text{kdy } \bar{P} = \eta \sqrt{N} \quad (5.14a)$$

což odpovídá velikosti akustického tlaku pro $q >> 1$ (v nadrezonanční oblasti).

Relativní průběh výklopu y je na obr. 5.9, a to pro různé jakosti Q_c . Také z tohoto grafu je zřejmá výhodnost volby Q_c v rozmezí 0,8 až 1.

Případný pokles kmitočtového průběhu v oblasti vyšších kmitočtů může být způsoben zvětšením impedance kmitací cívky vlivem její indukčnosti. Tento nezádoucí jev lze omezit pomocným měděným zkratovacím prstemem zasazeným do příložky magnetického obvodu (obr. 5.10). Vstupní impedance takto upravené



Obr. 5.10. Magnetický obvod reproduktoru opatřený zkratovacím prstemem pro změnění indukčnosti kmitací cívky

ho reproduktoru se pak v oblasti vyšších kmitočtů nezvětšuje, což je příznivé při připojení reproduktoru na výstupní svorky výhybek i s ohledem na případné fazové zkreslení v oblasti vyšších kmitočtů.

Pokud má být běžný reproduktor připojen na výstupní svorky výhybek, která pro správnou činnost vyžaduje reálnou zatěžovací impedanci, lze upravit výstupní impedanci reproduktoru v oblasti vyšších kmitočtů paralelním připojením obvodu ze sériové kombinace rezistoru R' a kondenzátoru C' (obr. 5.11).

Odpor R a kapacita kompenzačního pravku, které lze určit z kmitočtového průběhu výstupní impedance reproduktoru, jsou uvedeny v tabulce v další kapitole. V kompenzačním pravku lze použít i elektrolytic-

ký kondenzátor, protože pro správnou funkci obvodu není příliš kritická přesná velikost kapacity.

Při aplikaci přímovyzařujícího reproduktoru nutno mít na zřeteli skutečnost, že jeho směrová charakteristika závisí na poměru $2\pi R/L$. Od určitého kmitočtu je proto reproduktor pro příliš intenzivní směrování (čili velký činitel směrovosti) již těžko použitelný, pokud membrána kmitá pístově. To platí zejména pro hlubokotónové reproduktory. U běžných širokopásových reproduktorů je směrování místně omezeno vlivem parciálních kmitů membrány, zejména tím, že v oblasti vysokých kmitočtů se ve zvýšené míře uplatňuje jen její střední část.

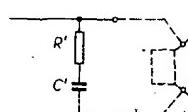
Nelineární zkreslení u přímovyzařujícího reproduktoru vzniká při velkých amplitudách membrány obvykle závislostí BI na amplitudě a to zejména při nesprávné klidové poloze kmitací cívky (je-li cívka jednosměrně vysunuta z optimální polohy). Za takových okolností vzniká i značné intermodulační zkreslení.

Při kmitočtech v blízkosti rezonance a nižších než rezonanční kmitočet se k již zmíněnému vlivu může připojit i nelineárta poddajného uložení kmitacího systému. Tato oblast kmitočtového pásmá však již není příliš zajímavá pro značné zmenšení citlivosti reproduktoru.

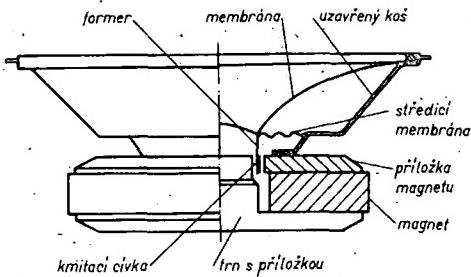
Při současném využívání signálu o nízkém kmitočtu f_1 a vysokém kmitočtu f_2 dochází ke zkreslení kmitočtovou modulací využívaného signálu o kmitočtu f_2 vlivem Dopplerova efektu (při přiblížování membrány k pozorovateli se kmitočet f_2 zvyšuje a při vzdalování se snižuje, což se děje periodicky, s kmitočtem f_1). Velikost tohoto zkreslení je dána výrazem $k = 0,29^2 \sqrt{P_a} / f_1 D^2$ [%; Hz; W, m], kde P_a je akustický výkon signálu o kmitočtu f_1 , a D aktivní průměr reproduktoru. Tento druh zkreslení lze omezit použitím vysokotónových reproduktorů, uplatňujících se současně s hlubokotónovým.

U reproduktoru vzniká při větším příkonu a při určitých kmitočtech signál o nižším kmitočtu (obvykle polovičním), než jakým je buzen. Přestože je úroveň tohoto signálu velmi nízká (často jen několik procent signálu původního), bývá velmi dobré sluchem postehnutelný, zejména při využívání sinusových tónů. Jedná se o takzvané subharmonické signály, které vzniknou, je-li vlastní kmitočet parciálních kmitů membrány právě polovinou kmitočtu budicího signálu. Jejich vznik je omezen u membrán nerozvinutelného tvaru, pokud jsou zhotoveny z materiálu o dostatečně velkém vnitřním tlumení.

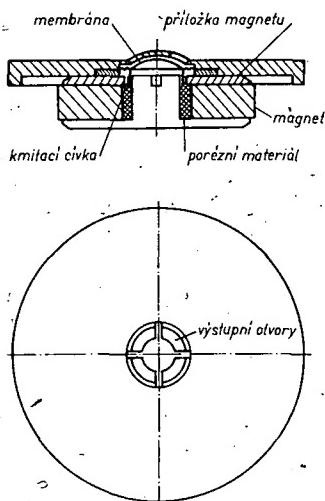
Vysokotónové elektrodynamické cívkové přímovyzařující reproduktory, které jsou v současné technice praxi běžné, jsou na obr. 5.12 a 5.13. První typ reproduktoru (obr. 5.12) svým provedením připomíná klasický elektrodynamický reproduktor. Jeho membrána má však podstatně menší průměr, což je nutné s ohledem na směrovou charakteristiku, krátkou kmitací cívku, která nepřesahuje půlový nástavec, někdy vnitřní středící prvek, obvykle přímo připojený na trnn magnetu a uzavřený koš. Membrána bývá u tohoto typu reproduktoru z papírové hmoty a její



Obr. 5.11. Obvod pro vyrovnání výstupní impedance reproduktoru v nadrezonanční oblasti



Obr. 5. 12. Schématický nákres jednoduchého elektrodynamického výškového reproduktoru



Obr. 5. 13. Schematický nákres vysokotónového reproduktoru s membránou ve tvaru kulového vrchliku

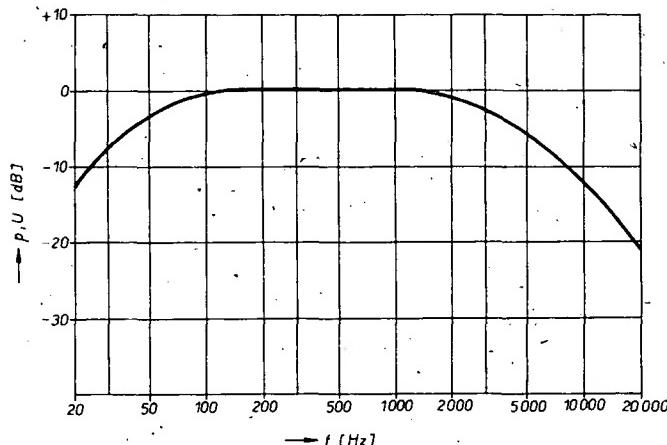
okraj má dosti značnou tuhost. Plocha membrány bývá poměrně malá (její průměr bývá vždy menší než 100 mm). Rezonanční kmitočet kmitacího systému bývá v rozmezí 1 až 1,5 kHz.

Vysokotónový reproduktor podle obr. 5.13 má membránu ve tvaru kulového vrchliku, zhotovenou obvykle z polymerové fólie. Jediným středícím prvkem kmitacího systému je jeho poddaný okraj. Kmitací cívka navinutá na dostatečně tuhém a s membránou pevně spojeném formeru mívá obvykle jednu vrstvu závitů, aby se zmenšila její hmotnost na minimum (což je nutné s ohledem na citlivost a kmitočtový průběh).

Průměr membrány takto řešeného reproduktoru nebyvá větší než 20 mm, takže je zaručeno jeho všeobecné vyzařování až do oblasti vysokých kmitočtů.

Budicí elektrický signál vysokotónových reproduktorů musí být vhodnými elektrickými obvody upraven tak, aby se na jejich svorkách neobjevilo napětí o nižším kmitočtu, než je dolní mezní kmitočet reproduktoru, obvykle předepsaný výrobcem.

Vysokotónový reproduktor doporučený pro aplikaci v reproduktorských soustavách o určitém jmenovitém příkonu (např. 20 W) nelze totiž v žádném případě zatížit tímto výkonem v oblasti pod jeho dolním mezním kmitočtem. Také jej však nelze zatížit plným výkonem ani v oblasti vysokých kmitočtů. Předpokládá se totiž, že přirozený akustický signál má spektrální složení odpovídající průběhu podle obr. 5.14; u něhož je relativní hladina signálů o vysokých kmitočtech proti úrovni o středních kmitočtů snížena.



Obr. 5. 14. Kmitočtový průběh zkoušebního signálu nahrazujícího přirozený signál (podle IEC)

5.1.1 Údaje nejdůležitějších typů hlubokotónových přímovyzařujících reproduktorů, vyráběných v ČSSR

V článku jsou uvedeny základní údaje přímovyzařujících reproduktorů vyráběných v ČSSR, použitelných pro osazení reproduktorských soustav, určených pro kvalitní reprodukci zvuku.

V tab. 2 jsou shrnutý údaje hlubokotónových reproduktorů, jejichž znalost je nezbytná pro návrh ozvučnic. Jedná se o údaje informativní, které se mohou poněkud lišit u různých výrobních sérií. Tak například hlubokotónové reproduktory o vnějším průměru 200 mm (typy ARN

6604/8), vyráběné v roce 1983 mají větší činitele Q_{el} i Q_c , takže je nelze bez dalších úprav použít ve spojení s bass-reflexovými ozvučnicemi. V každém případě je účelné ověřit si před návrhem ozvučnice (zejména bass-reflexové) (změřit nebo určit) vlastnosti použitého reproduktoru včetně použitelné maximální amplitudy.

V tab. 3 jsou základní údaje o středotónovém reproduktoru a vysokotónových reproduktorech, které lze použít při návrhu vícepásmových reproduktorských soustav.

Pokud mají být pro osazení reproduktorských soustav použity reproduktory

Tab. 2. Údaje hlubokotónových reproduktorů

Typ reproduktoru		ARN 5604		ARN 6604		ARN .8604		ARN 8608		ARN 934		ARN 932		ARN 734			
		mm	dm ²	Ω	W	kg/m ⁴	dm ³	Hz	T/m	0,46	0,50	0,68	0,76	0,40	0,4	0,48	0,46
Aktivní průměr membrány D	mm	134	1,4	172	172	250	250	334	327	225							
Plocha membrány S	dm ²			2,32	2,32	4,7	4,7	8,76	8,4	4							
Jmenovitá impedance Z _j	Ω	4	8	4	8	4	8	4	15	4							
Odpor vinutí kmit. cívky R _v	Ω	3,9	7,8	3,9	7,8	3,85	7,7	3,5	12,5	4							
Jmenovitý příkon N	W	15	15	20	20	30	30	50	25								
Akust. hmota m _{ak} kmit. systému	kg/m ⁴	64	64	40	40	30,4	31	10,4	8,4	25							
Ekvivalentní objem V	dm ³	45	45	83	85	280	280	160	470	185							
Rezonanční kmitočet f _r	Hz	35	38	33	34	26	26	46	30	28							
Konstanta B/S	T/m	350	480	220	295	202	285	148	207								
Činitel jakosti (elektrický) Q _{el,r}																	
Činitel jakosti (celkový) Q _{c,r}	-	0,42	0,45	0,6	0,66	0,38	0,38	0,40	0,42	0,62							
Činitel jakosti mechanický Q _{o,r}		4,5	4,5	5	5	6,9	7	2,26	5	15							
Citlivost η _{dB}	dB/V/V/m	88,5	89	89,5	90	90,7	91	98	96,5	90							
Maximální výkylka η	mm	3,5	3,5	4	4	4	4	2,5	3,5	3							
Horní mezní kmitočet	kHz	4 až 5	4 až 5	3 až 4	3 až 4	1	1	6	1	3							
Korekční obvod R, C	Ω	5,5	9	5,5	9	-	-	-	-	-							
	μF	12 až 25	10 až 15	12 až 25	10 až 15												

Tab. 3. Údaje středotónového a vysokotónových reproduktorů

Typ reproduktoru		Středotónový		Vysokotónové		reproduktoři	
		ARZ 4604	ARZ 4608	ARV 3604	ARV 3608	ARV 161	ARV 168
Aktivní průměr membrány	mm	95	95	26	26	-	-
Jmenovitá impedance	Ω	4	8	4	8	4	8
Jmenovitý příkon	VA	20	20	10	10	5	5
Dolní mezní kmitočet	kHz	0,5	0,5	2	2	1,5	1,5
Horní mezní kmitočet	kHz	4	4	20	20	20	20
Rezonanční kmitočet	kHz	0,23 až 0,25	-	1,2	1,2	1	1
Charakteristická citlivost	dB/V/A/m	89	89	89	89	92	92
Korekční obvod R', C'	Ω	5	10	-	-	-	-
	μF	10	5	-	-	-	-

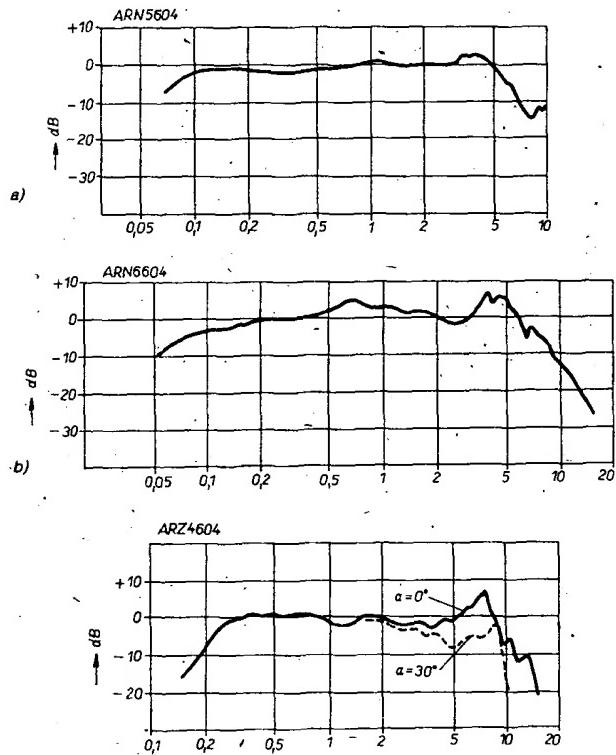
jiných typů, je nezbytné jejich základní vlastnosti změřit.

Kmitočtové charakteristiky hlubokotónových reproduktorů (měřené u reproduktoru umístěných na standardní ozvučnici) jsou na obr. 5.15. Pro posouzení vlastnosti reproduktoru má význam část průběhu v oblasti nad 200 až 400 Hz, protože průběh v oblasti nízkých kmitočtů je závislý na typu použité ozvučnice (o tom bude jednáno v příslušné kapitole).

Pro úplnost jsou na obr. 5.16 kmitočtové průběhy reproduktorů, upevněných ve standardní ozvučnici.

6. Nepřímovyzařující reproduktory

Membrána nepřímovyzařujících reproduktorů je spojena s vnějším prostředím zvukovodem. Jsou celkem tři možná zá-



5.1.2 Údaje středotónového a vysokotónových reproduktorů

V tab. 3 jsou základní údaje o středotónovém reproduktoru a vysokotónových reproduktorech, které lze použít v několika kapásmových reproduktorech soustavách. Jsou uvedeny jen typy, jejichž výroba se výhledově předpokládá.

Údaje potřebného korekčního obvodu R', C' jsou pouze u středotónového reproduktoru, u něhož mají význam.

Jde zde vesměs o reproduktory s uzavřeným košem, které lze bez dalšího vestavět do reproduktorech soustav (bez oddělení speciální uzavřenou skříňkou).

kladní uspořádání. U prvního (obr. 6.1c) je aktivní plocha membrány menší než plo-

cha hrdla zvukovodu, u uspořádání podle obr. 6.1b je plocha hrdla zvukovodu stejná jako plocha membrány, u třetího je vstupní plocha zvukovodu menší než plocha membrány (obr. 6.1a).

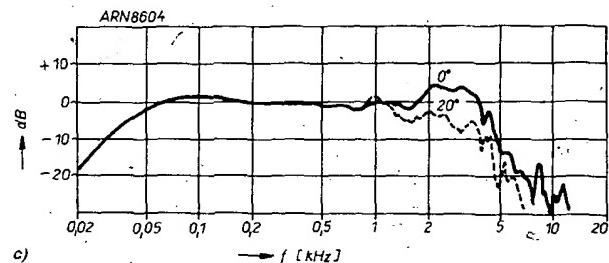
První uspořádání (c), u něhož je rychlosť membrány větší než rychlosť vzduchu vstupujícího do zvukovodu, se v současné době používá u hlubokotónových reproduktorů pro kina, u nichž se využívá toho, že délka zvukovodu je ze všech tří uvedených případů nejménší, stejně jako i akustická zátěž membrány. Lze zde aplikovat běžný typ hlubokotónového reproduktoru.

U uspořádání, u něhož je vstupní průřez zvukovodu stejný jako plocha membrány, je nad kritickým kmitočtem zvukovodu membrána o ploše S zatížena akustickou impedancí:

$$z_v = \frac{C_0 Q}{S} (A + jB)$$

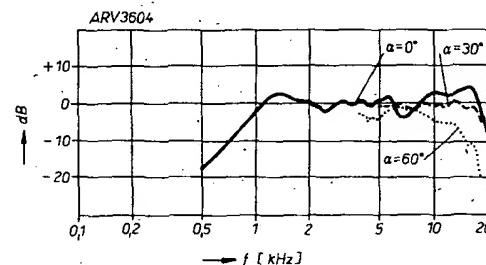
Akustický výkon, který membrána, produkující objemovou rychlosť $w (= vS)$ vyžádá v oblasti nad kritickým kmitočtem zvukovodu, pak je

$$P_a = \frac{C_0 Q}{S} w^2 = r_{v,ak} w^2$$



Obr. 5.15. Kmitočtové průběhy hlubokotónových reproduktorů TESLA; a) ARN 5604, b) ARN 6604, c) ARN 8604

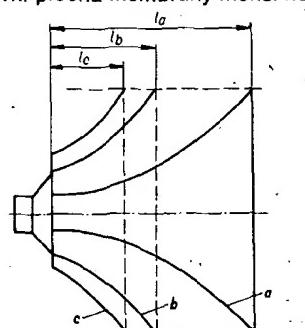
Obr. 5.16. Kmitočtové průběhy středotónového reproduktoru ARZ 4604 a vysokotónového reproduktoru ARV 3604



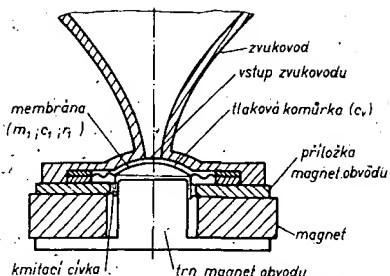
Pokud převažuje vyzařovací odpor r_v nad akustickou impedancí samotné membrány, je při konstantní síle působící na membránu i vyzařený akustický výkon konstantní.

Toto uspořádání elektroakustického měniče se používá například u nepřímovyzařujících páskových vysokotónových reproduktorů a jejich modifikací. Horní mezní kmitočet takového zářiče je charakterizován rovností vstupní akustické impedance zvukovodu a akustické impedance kmitající membrány.

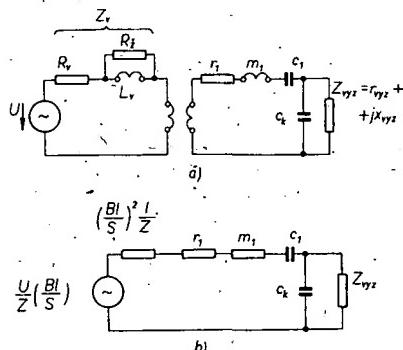
Membrána elektroakustického měniče o ploše S , navazující podle obr. 6.1a na vstup zvukovodu o ploše S_1 , je zatížena akustickou impedancí nezávislou na ploše této membrány. Zatěžovací impedance membrány je tedy větší než v prvních dvou případech. Omezení, pokud jde o přenos vyšších kmitočtů, však představuje akus-



Obr. 6.1. Možné navázání zvukovodu na membránu elektroakustického měniče



Obr. 6.2. Schematické uspořádání tlakového elektrodynamického reproduktoru



Obr. 6.3. Úplné ekvivalentní schéma tlakového reproduktoru (a) a schéma zjednodušené (b)

tická impedance dutiny mezi membránou a vstupem zvukovodu. Reproduktor, u něhož je vstupní průřez zvukovodu menší než plocha membrány, se nazývá reproduktor tlakový.

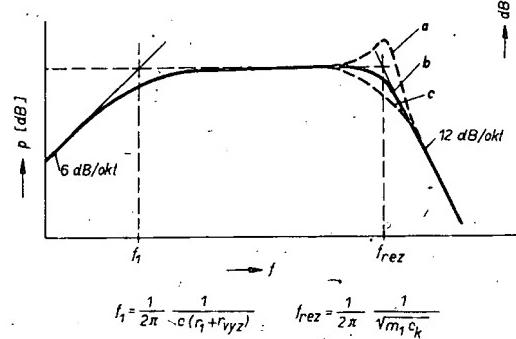
Schematické uspořádání elektrodynamického tlakového reproduktoru je na obr. 6.2; jeho analogicky obvod, z něhož lze stanovit výsledný teoretický kmitočtový průběh zářice, je na obr. 6.3. Tento obvod platí pro oblast kmitočtů vyšších, než je kritický kmitočet zvukovodu.

V oblasti nízkých kmitočtů, kdy se uplatňuje vliv poddajnosti kmitacího systému reproduktoru, se zvětšuje objemová rychlosť membrány přímo úměrně s kmitočtem (směrnicí této části kmitočtového průběhu je 6 dB/okt, viz obr. 6.4).

V oblasti středních kmitočtů, kdy v analogickém obvodu převládá vliv impedance zvukovodu, která je reálná a kmitočtově nezávislá, je objemová rychlosť nezávislá na kmitočtu stejně jako vyzářený výkon a akustický tlak před ústím reproduktoru.

V oblasti vysokých kmitočtů, kdy se uplatňuje vliv impedance dutiny komůrky před membránou reproduktoru a hmotnost kmitacího systému s membránou (popř. uplatnění rezonance této komůrky s hmotností kmitacího systému, při kmitočtu f_2), nastává zlom kmitočtové charakteristiky, která v nadrezonanční oblasti klesá se směrnicí 12 dB/okt.

Obr. 6.4. Teoretický kmitočtový průběh elektrodynamického tlakového reproduktoru. (Průběh v oblasti rezonančního kmitočtu je dán velikostí poměru $\frac{\omega_m m_1}{r_{yz}}$)



Kmitočty zlomů kmitočtové charakteristiky jsou dány vztahy

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{c_1 r_1}}, f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_1 c_k}} \quad (6.2)$$

přičemž činitel jakosti

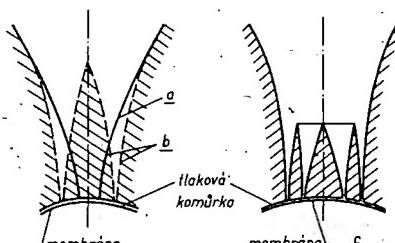
$$Q_s = \frac{2\pi f_2 m_1}{c_k \rho} \quad (6.3)$$

se má rovnat 1; c_1 a c_k jsou poddajnosti membrány a dutiny komůrky

$$c_k = \frac{S\delta}{\rho\alpha} \quad (6.4)$$

kde S je plocha membrány a δ výška komůrky.

To vše platí za předpokladu, že délka vlny přenášeného signálu je větší než průměr membrány. Není-li toto podmínka splněna, vznikají v tlakové komůrkě radiální kmity a zpoždění akustických rozruchů konečnými rozměry membrány, které podstatně ovlivní výsledný kmitočtový průběh měniče. Tento nežádoucí vliv lze omezit volbou několika výstění zvukovodu, anebo alespoň vyústěním ve tvaru mezikruží (obr. 6.5).



Obr. 6.5. Způsoby vyústění zvukovodu do komůrky: a) jednoduché vyústění, b) vyústění ve tvaru jednoho mezikruží, c) vyústění ve tvaru dvou mezikruží

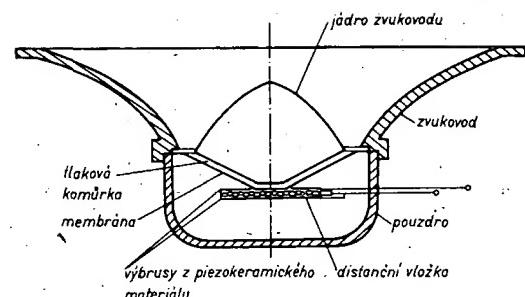
První nežádoucí mód radiálních kmitů se vyloučí, má-li vstup zvukovodu ve tvaru prstence poloměr $R_1 = 0,63R_a$, kde R_a je poloměr komůrky. Takové vyústění je u vysokotónových reproduktorů středního výkonu postačující.

Účinnost tlakového reproduktoru, daná výrazem

$$\eta = 1/[1 + (c_k \rho / S_1) R_1 (Bl / S)^2]^2] \cdot 100 \% \quad (6.5)$$

může být při vhodné konstrukci 10 až 20 %.

Kromě elektrodynamických nepřímo-využívajících vysokotónových reproduktorů se v posledních letech uplatňují piezoelektrické reproduktory s piezokeramickým měničem. Uspořádání takového reproduktoru, který v současné době vyrábí v několika provedeních firma MOTO-



Obr. 6.6. Schematické uspořádání piezoelektrického tlakového reproduktoru firmy Motorola

ROLA, je patrné z obr. 6.6. Elektromechanický měnič ve formě takzvaného Sawyera dvojčete se skládá ze dvou tenkých piezoelektricky aktivních kruhových destiček, opatřených po obou svých stranách vodivými vrstvami, které jsou paralelně propojeny. Destičky o průměru asi 25 mm mají tloušťku asi 0,1 mm a jsou pevně spojeny s distanční podložkou, zhotovenou z profilované kovové fólie. Tato úprava má za následek, že rezonanční kmitočet měniče je v oblasti 5 až 8 kHz.

Na střední část destičky je přitmelena kuželová membrána, svými okraji spojená s tělesem pouzdra reproduktoru, s nímž souvisí vhodně tvarovaný zvukovod, který navazuje na tlakovou komůrku vytvořenou před membránou.

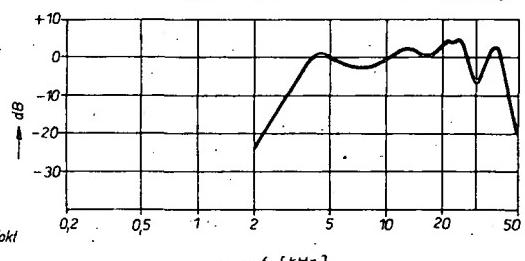
Piezoelektrický měnič je na svých okrajích volný a jeho střed kmitá proto, že se uplatňuje reaktance hmotnosti obvodu měniče. Přednost tohoto uspořádání spočívá v tom, že se u měniče neuplatňují parazitní rezonance, které by se nutně projevily, kdyby byl měnič po obvodu upnut.

Popsaný reproduktor je mimořádně citlivý a má velmi vyrovnaný kmitočtový průběh, podle typu buď od 3 do 35 kHz anebo od 1,5 do 30 kHz. Další předností reproduktoru je, že jej lze přímo bez výhybky připojit na výstup zesilovače a dále, že jeho příkon je ve srovnání s příkonem ostatních reproduktoriů soustavy zanedbatelně malý. Pro informaci je na obr. 6.7 kmitočtový průběh piezoelektrického vysokotónového reproduktoru KSN 6016 A.

Další předností tohoto reproduktoru je jeho mimořádně nízká cena.

7. Reproduktorová ozvučnice

U přímo využívajících reproduktoriů využívají jak přední, tak i zadní strana membrány a to tak, že fáze vzniklého akustického signálu před a za membránou je



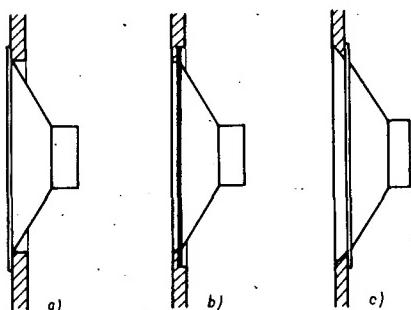
Obr. 6.7. Kmitočtový průběh reproduktoru Motorola typ KSN 6016A

opačná. Přímovyzárující reproduktor bez ozvučnice představuje v podstatě jeden ze základních záříčů, o němž již byla řeč, a to samotnou kmitající membránou ve volném prostoru, která v oblasti nízkých kmitočtů má velmi malou účinnost (akustický tlak ideálního reproduktoru s pohybem membrány řízeném její hmotností, ježí urychlén je konstantní, se v oblasti nízkých kmitočtů s rostoucím kmitočtem zvětšuje se směrnici 6 dB/okt).

Tento nežádoucí efekt lze změnit anebo odstranit použitím ozvučnice, která pak tvoří s reproduktorem vlastní vyzárující jednotku.

Ozvučnice jsou řešeny tak, že zvětšují akustickou impedanci mezi přední a zadní stranou membrány a to buď prodloužením dráhy mezi oběma jejimi stranami (deskové anebo otevřené skřínové ozvučnice), nebo odstranění nežádoucí vyzařování zadní strany reproduktoru jeho zakrytím nejlépe uzavřenou skříní, případně jiným vhodným prvky, uplatňujícími se jako akustický obvod. Základním požadavkem kladeným na všechny druhy ozvučnic je dostatečná tuhost jejich stěn, která má vyloučit nebo omezit jejich parazitní kmity.

Reproduktor má být montován do stěny ozvučnice tak, aby jeho ústí pokud možno lícovalo s přední stěnou této ozvučnice (viz obr. 7.1).



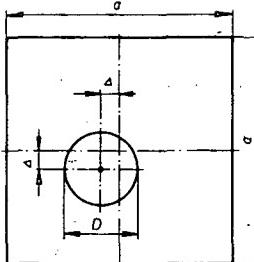
Obr. 7.1. Montáž reproduktoru do ozvučnice; a) montáž zepředu, b) montáž ze zadu, reproduktor zapuštěn, c) montáž ze zadu (nouzové provedení)

Jako záříč s vyhovujícími přenosovými vlastnostmi může pracovat měnič s dostačující rozlohou, pístové kmitající membránou, s obvodem rovným alespoň dvojnásobku délky vlny nejnižšího vyzařovaného signálu. Tak jsou řešeny například elektrostatické reproduktory firmy QUAD a velkoploché záříče, z nichž některé mají vestaven větší počet souběžně se uplatňujících elektrodynamických měničů, rozkmitávajících jedinou membránu z lehčeného pěnového materiálu (popřípadě vhodné povrchové upraveného).

V tomto případě se jedná v podstatě o záříč bez ozvučnice. V dalším budou popsány používané druhy reproduktoreční ozvučnice a uvedeny informace, umožňující jejich dimenzování s přihlednutím k požadovaným přenosovým vlastnostem.

7.1 Deskové ozvučnice

Nejjednodušším typem ozvučnice je ozvučnice desková, kterou se prodlužuje vzdálenost mezi přední a zadní stranou



Obr. 7.2. Desková ozvučnice a příslušné umístění reproduktoru

membrány reproduktoru. Tato ozvučnice se vyznačuje sice jednoduchostí (pokud nemáme na zřeteli komplikace, které přinášejí konkrétní realizace, kdy musí být dbáno na její dostatečnou tuhost), ale má značné rozměry.

Základní uspořádání je patrné z obr. 7.2. Reproduktor má být v ozvučnici, nejlépe přibližně čtvercové, umístěn mírně excentricky, aby se vyloučila interference zvukových vln, která by se projevila při symetrickém uspořádání.

Délka hrany a ozvučnice má být rovna alespoň polovině délky vlny signálu při dolním mezním kmitočtu f_0 .

Platí tedy, že

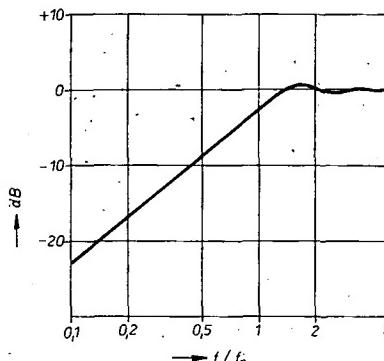
$$a = \lambda/2 = c_0/2f_0 \quad (7.1)$$

kde c_0 je rychlosť šíření zvuku.

Z tohoto výrazu lze určit kmitočet f_0 jako funkci délky a hrany ozvučnice:

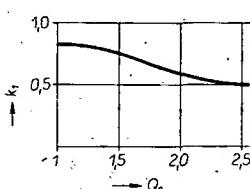
$$f_0 = 172/a \text{ [Hz; m]} \quad (7.2)$$

Na obr. 7.3 je kmitočtový průběh ideálního reproduktoru s membránou kmitající konstantním urychléním (takzvaný „reproduktor řízený hmotností“), vestavěný v této ozvučnici.

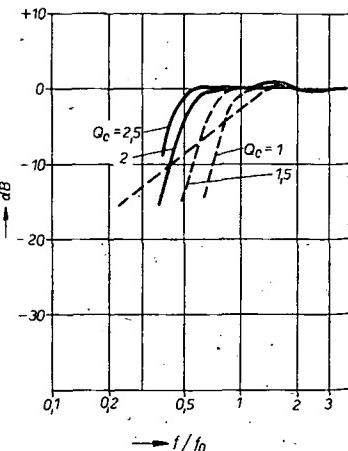


Obr. 7.3. Kmitočtový průběh ideálního reproduktoru v deskové ozvučnici (membrána reproduktoru kmití s konstantním urychléním)

Rozměry ozvučnice lze zmenšit, použíjte-li se reproduktoru o celkovém činiteli jakosti $Q_c > 1$. Pak při dolním mezním kmitočtu záříče rovném rezonančnímu kmitočtu reproduktoru ($f_d = f_{rez}$) bude f_0 konstanta k_1 závisí na Q_c reproduktoru (obr. 7.4).



Obr. 7.4. Závislost konstanty k_1 na činiteli jakosti reproduktoru při jeho rezonančním kmitočtu



Obr. 7.5. Kmitočtový průběh reproduktoru o činiteli jakosti $Q_c = 1, 1.5, 2$ a 2.5 ve spojení s deskovou ozvučnicí o daném kmitočtu f_0

V daném případě je pak délka strany deskové ozvučnice

$$a = (c_0/2f_{rez}) k_1 \quad (7.4)$$

Na obr. 7.5 jsou kmitočtové průběhy vyzařovacích jednotek o rozloze podle vztahu (7.4) s reproduktory o $Q_c = 1, 1.5, 2$ a 2.5 . Tyto průběhy vznikly složením průběhu podle obr. 7.3 a kmitočtových průběhů reproduktoru s příslušnými celkovými jakostmi Q_c .

Jako příklad stanovíme rozložení deskové ozvučnice pro eliptický reproduktor typu ARE 567, který má tyto hlavní veličiny:

$$\begin{aligned} f_{rez} &= 117 \text{ Hz}, \\ Q_c &= 2, \\ BI &= 167 \text{ [T/m]}, \\ S &= 1.33 \text{ dm}^2, \\ m_{ak} &= 25 \text{ kg/m}^4. \end{aligned}$$

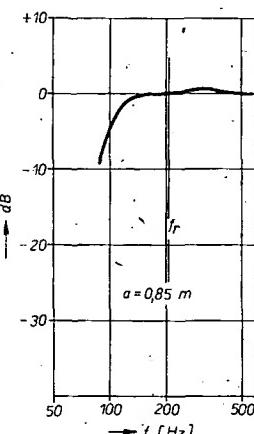
Základní kmitočet ozvučnice pro odpovídající $k_1 = 0.58$ je

$$f_0 = 117 \frac{1}{0.58} \approx 202 \text{ Hz}$$

a příslušná délka strany deskové ozvučnice

$$a = 0.85 \text{ m.}$$

Výsledný kmitočtový průběh reproduktoru ARE 567 v deskové ozvučnici o délce hrany 0,85 m, odpovídající grafu na obr. 7.5, je na obr. 7.5a.



Obr. 7.5a. Kmitočtový průběh reproduktoru o rezonančním kmitočtu 117 Hz a činiteli $Q = 2$ v optimálně navržené deskové ozvučnici

Tab. 4.

Reproduktor	Rez. kmitočet f_r reprodukтору v ozvučnici [Hz]	Dolní mezní kmitočet záříče	Objem ozvučnice [l]
ARN 5604/8	83	66,5	9
ARN 6604/8	55	44	42
ARN 8604/8	68	54,5	44
ARM 934	115	92	81
ARN 932	65	52	126
ARN 734	43	34,5	135

Lze ovšem použít ozvučnice o jiných objemech (například menších, než je uvedeno). Pak však kmitočtový průběh nebudé vyrovnaný. Pro některé případy (zejména u menších ozvučnic) lze však využít zvětšení akustického tlaku při rezonančním kmitočtu soustavy k selektivnímu zdůraznění signálů o nízkých kmitočtech.

Při pečlivějším prosetření vlastnosti reproduktoru, vestavěného v uzavřené ozvučnici, je účelné určit i kmitočtový průběh amplitudy membrány pro zvolený akustický tlak p , měřený při středních kmitočtech v ose reproduktoru ve vzdálenosti ξ [m] od jeho ústí. Amplituda membrány je pro daný případ dáná vztahem

$$y = (\xi / \sqrt{2} \omega) (1/S_m) \bar{p} (1/f_r^2) \frac{1}{(q^2 - 1) - j \frac{q}{Q'_c}} \quad (7.14)$$

popř.

$$y = 0,188 \frac{1}{S_m} \frac{1}{\bar{p}} \frac{1}{f_r^2} \frac{1}{(q^2 - 1) - j \frac{q}{Q'_c}} \quad (7.14a)$$

kde S_m je plocha membrány, f_r rezonanční kmitočet reproduktoru vestavěného v ozvučnici, q poměrný kmitočet ($f = f_r \cdot q$), Q'_c celkový činitel jakosti reproduktoru vestavěného v ozvučnici a \bar{p} požadovaný akustický tlak ve vzdálenosti ξ , případně 1 m.

Jako příklad určíme objem uzavřené ozvučnice pro reproduktor ARN 5604, dále jeho kmitočtový průběh pro oblast nízkých kmitočtů a kmitočtový průběh amplitudy membrány při konstantním napětí na vstupu reproduktoru, nutném pro dosažení hladiny akustického tlaku 1 Pa v ose ve vzdálenosti 1 m od jeho ústí.

Nejdříve určíme rezonanční kmitočet reproduktoru v uzavřené ozvučnici, při němž bude jeho činitel $Q'_c = 1$.

$$f_r = 35 \cdot \frac{1}{0,42} = 83,3 \text{ Hz.}$$

Objem ozvučnice vyplněný tlumicím materiélem (pěnovým molitanem) pak může být

$$V_{ozv} = 45 \cdot \frac{0,9}{\frac{83,3}{35}^2 - 1} = 8,7 \text{ l.}$$

Kmitočet, při němž se hladina akustického tlaku změní o 3 dB, je

$$f_d = 0,8 \cdot 83,3 = 66,6 \text{ Hz.}$$

Pro kontrolu si stanovíme amplitudu membrány pro hladinu akustického tlaku 94 dB ve vzdálenosti 1 m před membránou jednak pro rezonanční kmitočet ($q = 1$), jednak pro dolní mezní kmitočet ($q = 0,8$).

Hladina 94 dB odpovídá akustický tlak $p = 1 \text{ Pa}$. Pak je amplituda membrány pro $q = 1$

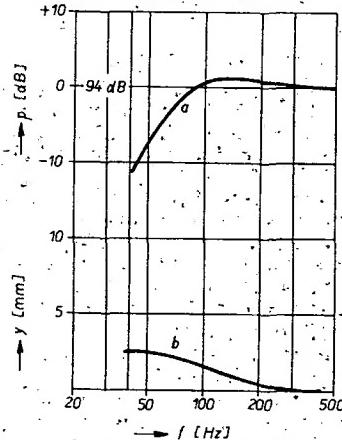
$$y = 0,188 \frac{1}{S} \frac{1}{f_r^2} p = \\ = 0,188 \frac{1}{1,4 \cdot 10^{-2}} \frac{1}{83,3^2} \cdot 1 = 1,94 \text{ mm.}$$

a pro $q = 0,8$ ($f = 0,8 \cdot 83,3 = 66,6 \text{ Hz}$), kdy se kmitočtový průběh sníží o 2,7 dB

$$y = 0,188 \frac{1}{S} \frac{1}{f_r^2} p = \\ = 0,188 \frac{1}{(0,8^2 - 1)} \frac{1}{(0,8)^2} = 2,2 \text{ mm.}$$

Kmitočtový průběh hladiny akustického tlaku a amplitudy membrány pro akustický tlak 1 Pa ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru je v grafu na obr. 7.10.

Pro úplnost je vhodné uvést vztah pro citlivost-vyzařovací jednotky s uzavřenou



Obr. 7.10. Kmitočtový průběh reproduktoru ARN 5604 v uzavřené ozvučnici o objemu $V = 8,7 \text{ l}$; a) průběh hladiny akustického tlaku ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru, b) průběh amplitudy membrány

ozvučnici, analogický vztahu pro samotný reproduktor. Pro citlivost platí vztah

$$\eta_{dB} = 52,1 + 10 \log \left(\frac{f^2 V_c}{Q_e} \right) \quad [\text{dB/V}\sqrt{\text{A/m}}; \text{Hz}, \text{m}^3] \quad (7.15)$$

kde f je rezonanční kmitočet reproduktoru vestavěného v uzavřené ozvučnici, Q_e jeho elektrický činitel kvality a V_c objem, daný paralelní kombinací ekvivalentního objemu reproduktoru a objemu ozvučnice

$$V_c = \frac{V_{ekv} V_{ozv}}{V_{ekv} + V_{ozv}}$$

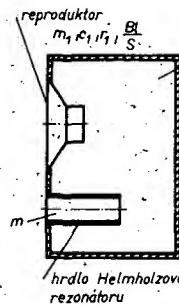
Tento vztah platí ovšem pro vyzařování do poloprostoru. Při vyzařování do plného prostoru je v oblasti nízkých kmitočtů citlivost o 6 dB menší.

Je zřejmé, že mezi rezonančním kmitočtem vyzařovací jednotky a objemem ozvučnice (Q_e bývá obvykle přibližně rovno 1) jednoznačná souvislost. Z toho je patrné, že nelze zhodit jednotku o velmi nízkém dolním mezním kmitočtu, malém objemu a velké citlivosti.

Optimální kmitočtový průběh se získá při $Q_e = 0,9$. Je-li současně $V_{ekv} = 4V_{ozv}$ (tedy $V_c = V_{ozv}$, $Q_e = 0,8$), je pro zvolený dolní mezní kmitočet f_d a objem ozvučnice V_{ozv} dosažitelná citlivost

$$\eta_{dB} = 51,6 + 10 \log \left(\frac{f_d^2 V_{ozv}}{m} \right) \quad [\text{dB/V}\sqrt{\text{A/m}}; \text{Hz}, \text{m}^3] \quad (7.16)$$

Správnost návrhu vyzařovací jednotky s uzavřenou ozvučnicí lze ověřit jednak měřením průběhu elektrické vstupní impedancie použitého reproduktoru, jednak měřením výsledného kmitočtového průběhu akustického tlaku a to nejlépe v blíz-



Obr. 7.11. Schematické uspořádání bass-reflexové ozvučnice

kém akustickém poli. Podrobnosti budou uvedeny v kapitole o měření reproduktoru a reproduktorových soustav.

7.4 Bass-reflexová ozvučnice

Základní uspořádání bass-reflexové ozvučnice s přímovyzařujícím reproduktorem je na obr. 7.11. Reproduktor je umístěn ve stěně ozvučnice a na své zadní straně je zatízen obvodem Helmholtzova rezonátoru, jehož ústí tvoří buď otvor nebo hrátku ve tvaru nátrubku. V oblasti rezonančního kmitočtu rezonátoru

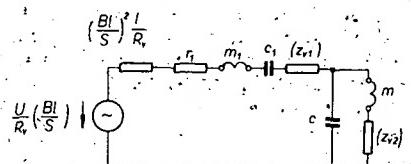
$$\left(f_{ozv} = \frac{1}{2\pi\sqrt{mc}} \right)$$

je zadní strana reproduktoru

zatížena poměrně velkou akustickou impedancí rezonátoru, přičemž vzdich proudící jeho hrátku objemovou rychlosť v podporu významnou měrou vyzařování přední strany membrány. Při rezonančním kmitočtu ozvučnice se amplituda membrány reproduktoru podstatně zmenší.

Nespornou předností vyzařovací jednotky s bass-reflexovou ozvučnicí ve srovnání se zářičem s uzavřenou ozvučnicí, při daném dolním mezním kmitočtu její menší rozměry a zejména pak větší citlivost.

Vlastnosti vyzařovací jednotky s bass-reflexovou ozvučnicí vyplývají z ekvivalentního schématu na obr. 7.12, z jehož rozboru vyplývá jak její výsledný kmitoč-



Obr. 7.12. Zjednodušené ekvivalentní schéma reproduktoru v bass-reflexové ozvučnici

tový průběh, tak i průběh amplitudy membrány. Také v tomto případě se předpokládá, že jednotka vyzařuje do poloprostoru.

Vedle základních veličin reproduktoru ($f_r, m_1, C_1, S, Q_{el}, Bl/S$) je nutno znát také vlastnosti ozvučnice:

$$f_{ozv} = \frac{59,55}{\sqrt{m V_{ozv}}} \quad [\text{Hz}] \quad \text{rezonanční kmitočet ozvučnice} \quad (7.17)$$

V_{ozv} [m³] objem ozvučnice,

$$m \text{ [kg/m⁴] akustická hmotnost vzduchu v hrátku ozvučnice,}$$

$$Q_{el} = \frac{2\pi f_{ozv} m}{r} \quad \text{činitel jakosti ozvučnice} \quad (7.18),$$

akustický odpor charakterizující ztráty ozvučnice.

$$\gamma = \frac{m}{m_1}$$

poměr akustické hmotnosti vzduchu v hrdle ozvučnice a hmotnosti systému reproduktoru (7.19),

$$f = qf_{ozv} [\text{Hz}] \quad \text{kmitočet} \quad (7.20),$$

$$\gamma = \frac{f_{ozv}}{f_r} \quad (7.21),$$

$$\bar{Q}_{c,ozv} = Q_{c,r} \frac{f_{ozv}}{f_r} \quad (7.22),$$

$$\bar{Q}_{el,ozv} = Q_{el,r} \frac{f_{ozv}}{f_r} \quad (7.23).$$

Pro úplnost je uveden zjednodušený vztah pro kmitočtový průběh reproduktoru ve spojení s bass-reflexovou ozvučnicí a průběh amplitudy membránového reproduktoru pro případ, kdy je činitel jakosti ozvučnice Q_B dostatečně veliký (≥ 20), což je počítivé provedení ozvučnice, při membráně s kmitací cívkou uzavřenou koupolkou a neprodyšných poddajných vlnách může být splněno. Při menších činitelích Q_B bývá ovlivněn kmitočtový průběh v blízkosti f_{ozv} .

$$P = \frac{\bar{p}}{\xi} \frac{q^4}{[(q^2-1)(q^2-\frac{1}{\gamma^2})-q^2] + i(q^2-1) \frac{q}{\bar{Q}_{c,ozv}}} \quad (7.24)$$

$$y = 0,188 \xi \frac{1}{S f_{ozv}^2} \frac{1}{|q^2 - \frac{1}{\gamma^2} + q^2 - \frac{1}{\gamma^2}| + \frac{q}{\bar{Q}_{c,ozv}}} \quad (7.25)$$

Kmitočtové průběhy akustického tlaku P závisí značně na činiteli $\bar{Q}_{c,ozv}$ a na poměru $m/m_1 (= \gamma)$, poměrně však málo na poměru rezonančního kmitočtu ozvučnice f_{ozv} a rezonančního kmitočtu reproduktoru f_r , čili na γ , pokud je ≥ 1 . Důležité však je, že pro dolní mezní kmitočet f_d vyzařující jednotky, tedy pro kmitočet, při němž neklesá kmitočtový průběh více než o 1 až 3 dB, lze dostatečně přesně psát

$$f_d = f_{ozv} \sqrt{\gamma} \quad (7.26),$$

což platí pro $\gamma \geq 1$. Tento poznatek lze účelně využít při předběžném návrhu bass-reflexové ozvučnice, jak bude uvedeno dále.

V každém případě se však doporučuje kontrola amplitudy membránového reproduktoru podle výrazu (7.25), nebo je třeba alespoň přibližně zjistit, není-li v nadrezonanční oblasti při zvoleném akustickém tlaku P_1 překročena maximální přípustná amplituda y_{max} .

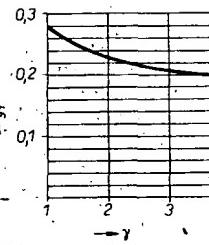
Pro přibližné, ale pro běžnou praxi postačující zjištění maximální amplitudy membránového reproduktoru pro zvolený akustický tlak P_1 [Pa] ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru lze vycházet ze vztahu

$$y_{max} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\rho} \frac{1}{S_m} \frac{\bar{p}_1}{f_{ozv}^2} g_1 \quad [\text{m; Pa, m}^2, \text{Hz}] \quad (7.27)$$

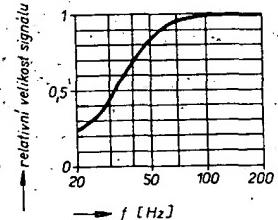
$$y_{max} = 1,88 \cdot 10^{-2} \frac{1}{S_m} \frac{\bar{p}_1}{f_{ozv}^2} g_1 \quad [\text{mm; m}^2, \text{Pa, Hz}]$$

kde g_1 pro známý γ ozvučnice lze zjistit z grafu na obr. 7.13.

Pro případ, že je dolní mezní kmitočet vyzařovací jednotky nižší než 100 Hz, což je obvyklé, je účelné brát ohled na spektrální složení přirozeného akustického signálu, u něhož se v oblasti pod 100 Hz snižuje hladina akustického tlaku (viz obr. 7.14). Pak za P_1 je nutno dosadit reduko-



Obr. 7.13. Graf pro přibližné stanovení maximální amplitudy membránového reproduktoru v bass-reflexové ozvučnici (závislost g_1 na γ)



Obr. 7.14. Porovnání hodnota složek spektra přirozeného signálu pohle IEC (viz obr. 5.14) pro stanovení amplitudy membránového reproduktoru

vanou velikost $P_1 = p_1 k$, a to odpovídající kmitočtu f_m , při němž je amplituda membránová maximální (pro hrubou informaci postačí, uvažujeme-li $f_m = \sqrt{2}f_{ozv}$).

Při podrobnejším výpočtu je nutno stanovit kmitočtový průběh amplitudy membránové odpovídající výrazu 7.25.

Vedle maximální výkylky membránové je účelné určit i maximální rychlosť vzduchu v_{max} proudícího hrdlem ozvučnice, která nemá překročit špičkovou hodnotu 10 m/s. Rychlosť lze určit s dostatečnou přesností ze vztahu

$$v_{max} = 1,5 \frac{P_1}{D_h^2 f_{ozv}^2 q^2} \quad [\text{m/s; Pa, m, Hz, } -] \quad (7.28)$$

Akustický tlak P_1 je skutečná hodnota, kterou vytvoří vyzařovací jednotka ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru při vyzařování do poloprostoru, q je relativní kmitočet ($q = \frac{f}{f_{ozv}}$), f_{ozv} rezonanční kmitočet ozvučnice a D_h vnitřní průměr hrdla ozvučnice.

Důležitým prvkem Helmholtzova rezonátoru a tím i bass-reflexové ozvučnice je akustická hmotnost m , daná hmotností vzduchu kmitajícího v hrdle rezonátoru, tvořeného buď pouhým otvorem ve stěně (obvykle přední) ozvučnice, nebo hrdlem o světlosti D_h a délce l .

Akustická hmotnost vzduchu v takovém hrdle je dáná vztahem

$$m = \rho \left(\frac{3,4}{\pi D_h} + \frac{4l}{\pi D_h^2} \right) \quad [\text{kg/m}^4, \text{kg/m}^3, \text{m}] \quad (7.29)$$

kde první člen představuje akustickou hmotnost vzduchu na konci nátrubku, druhý člen hmotnost vzduchu ve vlastním nátrubku a ρ je specifická hmotnost vzduchu ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$).

Pro úplnost je uveden základní vztah pro dosažitelnou citlivost záříče s bass-reflexovou ozvučnicí:

$$\eta_{dB} = 52,1 + 10 \frac{f_d^3 V}{Q_{ozv}} \quad [\text{dB/VA/m}] \quad (7.30)$$

Jak patrné, největší citlivosti pro daný dolní mezní kmitočet se dosáhne při $\gamma = 1$. Protože, jak bylo již uvedeno, nejvyrovnanější kmitočtový průběh je při $Q_{ozv} = 0,4$, je při objemu ozvučnice V a dolním mezním kmitočtu f_d největší dosažitelná citlivost

$\eta_{dB} = 56,1 + 10 \log f_d^3 V$ (7.31), která je za optimálních podmínek asi o 4 až 4,7 dB větší než citlivost záříče o stejném dolním mezním kmitočtu a stejném objemu při aplikaci uzavřené ozvučnice. Pro využití této možnosti musí být ovšem k dispozici reproduktor potřebných vlastností.

U bass-reflexové ozvučnice je zajímavý kmitočtový průběh vstupní impedance použitého reproduktoru, který vykazuje dvě maxima a jedno minimum; to při rezonančním kmitočtu ozvučnice f_{ozv} . Dvě maxima impedance nastávají přibližně při kmitočtech

$$f_{1,2} = (f_{ozv}/\sqrt{2})(\sqrt{2} + \gamma \pm \sqrt{4 + \gamma}) \quad (7.32)$$

Z elektrické impedance reproduktoru měřené při rezonančním kmitočtu ozvučnice lze určit při známých vlastnostech reproduktoru (B_1, R_v, S) činitel jakosti Q_B použitého Helmholtzova rezonátoru, který je

$$Q_B = (B_1/S)^2 \frac{1}{\Delta R} 2\pi f_{ozv} \frac{V}{P_{ox}} \quad (7.33)$$

Z velikosti Q_B lze usuzovat na kvalitní provedení ozvučnice, zejména na ztráty v nátrubku a na netěsnosti ozvučnice, včetně netěsnosti membránového reproduktoru. Činitel Q_B má být větší než 10.

Veličina ΔR ve vztahu (7.33) je rozdíl vstupní impedance Z_{ozv} reproduktoru při rezonančním kmitočtu ozvučnice a činného odporu kmitací cívky reproduktoru, tedy $\Delta R = Z_{ozv} - R_v$. Důležité přitom je, aby se měření uskutečnilo při malém zatížení reproduktoru, nejvíše při 1/10 jmenovitého příkonu, aby se odpor vinutí kmitací cívky nezměnil proti klidové velikosti.

V dalším je uveden postup při návrhu bass-reflexové ozvučnice pro hlubokotónový reproduktor známých vlastností. Použitý reproduktor má mít neprodyšnou membránou a neprodyšné poddajné vlnky. Střed membránového reproduktoru musí být zakryt neprodyšnou koupkou.

Při návrhu ozvučnice stanovíme nejprve její rezonanční kmitočet tak, aby $Q_{ozv} = 0,4$ až 0,45.

$$\text{Pak } f_{ozv} = f_r \frac{0,4 \text{ až } 0,45}{Q_r} \quad (7.34)$$

$$\text{přičemž má být } f_{ozv}/f_r \geq 0,8 \quad (7.35),$$

kde f_r je rezonanční kmitočet reproduktoru.

Dále si zvolíme dolní mezní kmitočet f_d vyzařovací jednotky tak, aby

$$f_d = f_{ozv} (1 \text{ až } 2)$$

a tím i $\gamma = (f_d/f_{ozv})^2$, která nemá být větší než 4.

Výhodné jsou menší γ (do $\gamma = 2$), při nichž se účelně využije zmenšení amplitudy membránové v nadrezonanční oblasti ozvučnice. Dolní mezní kmitočet záříče nesmí být příliš vzdálen od rezonančního kmitočtu ozvučnice.

Objem V ozvučnice se pro daný reproduktor určí ze vztahu

$$V = \frac{P_{ox}}{(2\pi f_d)^2 m_1} \cdot 10^3 = \frac{3,55 \cdot 10^6}{f_d^2 m_1} \quad [\text{l; kg/m}^4, \text{Hz}] \quad (7.36)$$

kde m je akustická hmotnost kmitacího systému použitého reproduktoru. Uvedený výraz vyjadřuje vzájemnou souvislost mezi dolním mezním kmitočtem f_d , zářiče a objemem V ozvučnice. Jak patrné, rozhodující význam má akustická hmotnost m , kmitacího systému reproduktoru, která bývá větší u reproduktorů malých průměrů.

Akustická hmotnost vzduchu v hrdle rezonátoru je

$$m = m_1 (f_d/f_{ozv})^2 (= m_1 \gamma) \quad (7.37)$$

Zvolíme-li průměr nátrubku D_h [m], bude jeho délka /

$$l = 0,654 D_h (D_h m - 1,3) \quad [m; m, kg/m^4] \quad (7.38)$$

Tato délka musí být volena tak, aby se nátrubek do ozvučnice bez obtíží vešel, to znamená, že mezi jeho koncem a zadní stěnou ozvučnice musí být vzdálenost větší (nejvýše rovná) než je průměr hrdla ozvučnice. Pokud má hrdlo obdélníkovitý průřez, může být vzdálenost mezi vnitřním ústím hrdla a nejbližší stěnou alespoň rovna jeho menšímu rozdílu (šířce).

Minimální plocha hrdla je omezena maximální přípustnou rychlosťí vzduchu v něm vznikající, jak je uvedeno dále.

Tím jsou stanoveny hlavní údaje ozvučnice. Postup při návrhu a jeho kontrole nejlépe osvětlí příklad.

Navrheme, vyzařovací jednotku s bass-reflexovou ozvučnicí pro reproduktor ARN-5604. Při návrhu vycházíme z údajů reproduktoru v tab. 2.

Rezonanční kmitočet ozvučnice:

$$f_{ozv} = f_r \frac{0,4}{Q_r} = 35 \frac{0,4}{0,42} = 33,3 \text{ Hz}$$

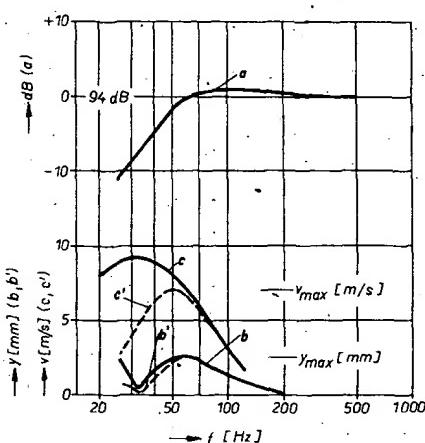
Podmínka $\frac{f_{ozv}}{f_r} = \frac{33,3}{35} = 0,95 > 0,8$ je splněna.

Dolní mezní kmitočet zářiče

$$f_d = f_{ozv} (1 \text{ až } 2) = 33,3 \cdot 1,5 = 50 \text{ Hz}$$

Objem ozvučnice

$$V = \frac{3,55 \cdot 10^6}{m f_d^2} = \frac{3,55 \cdot 10^6}{64,50^2} = 22,2 \text{ l}$$



Obr. 7.15. Kmitočtový průběh zářiče s bass-reflexovou ozvučnicí o objemu 22,8 l a reproduktorem ARN 5604 (a) $f_{ozv} = 33,3 \text{ Hz}$, $Q_{ozv} = 0,4$, průběh amplitudy membrány (b) a průběh rychlosti vzduchu v hrdle rezonátoru (c) při konstantním vstupním napětí reproduktoru a při buzení přirozeným signálem (b', c')

Hmotnost vzduchu v hrdle zvukovodu

$$m = m_1 \left(\frac{f_d}{f_{ozv}} \right)^2 = 64 \left(\frac{50}{33,3} \right)^2 = 144,3 \text{ kg/m}^4$$

$$\text{a } \gamma = \left(\frac{50}{33,3} \right)^2 = 2,25$$

Hrdlo zhotovíme z novodurové trubky o světlosti 45 mm. Potřebná délka hrdla

$$l = 0,654 \cdot 45 \cdot 10^{-3} (45 \cdot 10^{-3} \cdot 144,3 - 1,3) = 0,153 \text{ m}$$

Maximální amplituda membrány bude při konstantním vstupním napětí na svorkách reproduktoru a akustickém tlaku $p_1 = 1 \text{ Pa}$ ve vzdálenosti 1 m od ústí reproduktoru

$$y_{max} = 188 \frac{1}{S} \frac{p_1}{f_{ozv}^2} g_1 =$$

$$= 188 \cdot \frac{1}{1,4 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{1}{33,3^2} \cdot 0,22 = 2,66 \text{ mm},$$

přičemž při f_{ozv} (33,3 Hz) se relativní úroveň akustického tlaku změní o

$$20 \log \gamma = 7 \text{ dB},$$

a při $f_d = 50 \text{ Hz}$ pouze o 0,2 dB.

Závěrem si určíme maximální rychlosť vzduchu v hrdle rezonátoru při dolním mezním kmitočtu $f_d = 50 \text{ Hz}$

$$(q = \frac{50}{33,3} = 1,5) \text{ ze vztahu (7.28):}$$

$$V_{max} = 1,5 \frac{1}{(45 \cdot 10^{-3}) \cdot 33,3 \cdot 1,5^2} = 10 \text{ m/s.}$$

Protože však při 50 Hz lze očekávat u přirozeného signálu pokles akustického tlaku na 0,85 hodnoty při středních kmitočtech při současném poklesu kmitočtové charakteristiky zářiče asi o 0,2 dB, bude špičková rychlosť vzduchu v hrdle

$$V_{max} \cdot 0,85 \cdot 0,79 = 6,75 \text{ m/s,}$$

což je přijatelné.

Veškeré kmitočtové průběhy, které byly určeny podle dřívě uvedených vztahů, jsou pro informaci uvedeny na obr. 7.15.

V případě, že chceme pro daný reproduktor navrhnut ozvučnici o zvoleném objemu V , určíme si nejprve ze vztahu (7.36) její dolní mezní kmitočet f_d a z podílu f_d a rezonančního kmitočtu reproduktoru velikost $\gamma = \frac{f_d}{f_{ozv}}$

Tak lze například pro ozvučnici o objemu $V = 12 \text{ l}$ a reproduktorem ARN 5604 určit jednak rozdíly potřebného hrdla, jednak přenosné vlastnosti zářiče.

S ohledem na vlastnosti zvoleného reproduktoru je nutno volit obdobný rezonanční kmitočet ozvučnice jako v předešlém případě. Vzhledem k tomu, že se jedná o malou vyzařovací jednotku s vysokým dolním mezním kmitočtem, lze připustit poněkud větší zvlnění kmitočtového průběhu související s poněkud větším činitelem Q_{ozv} , který pro daný případ zvolíme na horní možné mezi (tedy 0,45). Pak bude

$$f_{ozv} = 35 \frac{0,45}{0,43} = 37,5 \text{ Hz.}$$

Dolní kmitočet bude v tomto případě $f_d = 1,88 \cdot 10^3 \sqrt{m/V}$ [Hz; kg/m⁴; l] (7.36a)

$$f_d = 67,8 \text{ Hz.}$$

Pak

$$\gamma = \frac{67,8}{37,5} = 3,27,$$

což je hodnota značně velká, která naznačuje, že se již nebudu příliš lišit elektroakustické vlastnosti zářiče s bass-

-reflexovou ozvučnicí od zářiče s uzavřenou ozvučnicí stejně objemu.

Akustická hmotnost v hrdle ozvučnice

$$m = m_1 \gamma = 64 \cdot 3,27 = 209 \text{ kg.}$$

Pak bude délka hrdla o světlosti $D_h = 32 \text{ mm}$

$$l = 0,654 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} (3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 209 - 1,3) = 11 \text{ cm.}$$

Jak je z uvedeného zřejmé, je pro daný typ reproduktoru možno navrhnut a realizovat celou řadu bass-reflexových ozvučnic s různými dolními mezními kmitočty, z nichž jednoznačně vyplývá příslušný objem ozvučnice.

Z podrobnějších analýz uzavřených a bass-reflexových ozvučnic vyplývá poznatek, že bass-reflexová ozvučnice je účelná, je-li její objem

$$V \geq \frac{V_{ekv}}{(0,85 \text{ až } 1/Q_{rc})^2 - 1} \quad (7.39)$$

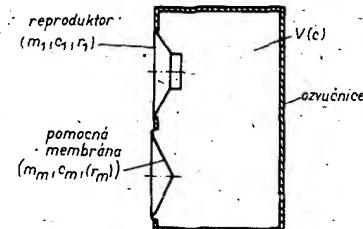
nebo její dolní mezní kmitočet f_d nižší než

$$\frac{0,85}{Q_r} f_r$$

$$\text{tedy } f_d \leq \frac{0,85}{Q_r} f_r \quad (7.40).$$

7.5 Bass-reflexová ozvučnice s pomocnou membránou

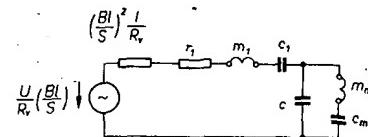
Zvláštní modifikace bass-reflexové ozvučnice, u níž je akustická hmotnost Helmholzova rezonátoru reprezentována hmotností membrány, je na obr. 7.16.



Obr. 7.16. Schematické uspořádání bass-reflexové ozvučnice s pomocnou (pasivní) membránou

Pomocná membrána o akustické hmotnosti m_m a poddajnosti c_m musí mít rezonanční kmitočet f_m značně nižší, než je rezonanční kmitočet ozvučnice.

Ekvivalentní schéma tohoto typu ozvučnice je na obr. 7.17; které v podstatě odpovídá až na větev m_m , c_m (akustická hmotnost pomocné membrány a její akustická poddajnost) ekvivalentnímu schématu klasické bass-reflexové ozvučnice (viz obr. 7.12).



Obr. 7.17. Žejnodušené ekvivalentní schéma reproduktoru v ozvučnici podle obr. 7.16

Je-li rezonanční kmitočet pomocné membrány $f_{m,rez}$, nastane paralelní rezonance obvodu C , m_m , c_m při kmitočtu f_{ozv} , který je vlastně rezonančním kmitočtem tohoto modifikovaného typu Helmholzova rezonátoru.

$$f_{ozv} = f_{m,rez} \sqrt{\frac{c_m + C}{C}} \quad (7.41).$$

Poměr rezonančního kmitočtu ozvučnice a rezonančního kmitočtu pomocné membrány označíme písmenem μ

$$\mu = \frac{f_{ozv}}{f_{m,rez}} = \sqrt{\frac{c_m + c}{c}} = \sqrt{\frac{V_{m,ekv} + V}{V}} \quad (7.42)$$

Současně platí pro rezonanční kmitočet ozvučnice základní vztah (rezonance obvodu c , c_m a m_m)

$$f_{ozv} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_m c}{c_m + c}} m_m \quad (7.43)$$

kde m_m je akustická hmotnost pomocné membrány. Podobně jako u klasického bass-reflexu si označíme poměr akustické hmotnosti pomocné membrány m_m a akustické hmotnosti membrány reproduktoru symbolem γ_1 :

$$\gamma_1 = \frac{m_m}{m_1} \quad (7.44)$$

Kmitočtový průběh vyzařovací jednotky s pomocnou membránou je dán zjednodušeným vztahem

$$\frac{P}{\xi} = \frac{q^4}{[(q^2 - 1)(q^2 - \frac{1}{v^2}) - \gamma_1(q^2 - \frac{1}{\mu^2})] + \frac{q}{Q}(q^2 - 1)} \quad (7.45)$$

kde symboly v a q mají stejný význam jako ve vztahu 7.24 pro kmitočtový průběh zářice s klasickou bass-reflexovou ozvučnicí.

Podobně jako bylo třeba u klasické bass-reflexové vyzařovací jednotky kontrolovat maximální rychlosť vzduchu, je nutno v daném případě zjišťovat, zda pro zvolený akustický tlak p , uvažovaný ve vzdálenosti ξ , není překročena možná amplituda y_{max} pomocné membrány, která je dána výrazem

$$y_{max} = \xi \frac{240\bar{p}}{D^2 m_f^2 f_{ozv}^3 Q^3} \quad [\text{mm; Pa, m, Hz}] \quad (7.46)$$

Při návrhu ozvučnice s pomocnou membránou se obvykle vychází ze zvoleného-reprodukторu o známých velikostech základních veličin ($Q_{f,ozv}$, f_r , m_1 , y_{max}). U pomocné membrány je nutno znát její akustickou hmotnost m_m a akustickou poddajnost c_m , případně odpovídající ekvivalentní objem ($V_{m,ekv} = c_m \cdot 1,4 \cdot 10^5$) a její plochu S_m , případně aktivní průměr D_m .

Podobně jako při návrhu klasické bass-reflexové ozvučnice se určí její rezonanční kmitočet f_{ozv} ze vztahu $f_{ozv} = f_r (0,35 \text{ až } 0,4 Q_{f,ozv})$ (7.47) a objem ozvučnice V ze zvoleného dolního kmitočtu f_d ,

$$V = \frac{1}{(2\pi f_d)^2} \frac{p_{0x}}{m_1} = \frac{3,54 \cdot 10^6}{f_d^2 m_1} \quad [l; \text{Hz}, \text{kg/m}^4] \quad (7.48)$$

kde m_1 je akustická hmotnost membrány použitého reproduktoru.

Potřebnou celkovou akustickou hmotnost membrány $m_{m,celk}$ určíme ze vztahu

$$m_{m,celk} = \frac{1}{(2\pi f_{ozv})^2} \frac{V_{m,ekv} + V}{V_{m,ekv} V} p_{0x} \quad (7.49)$$

čili

$$m_{m,celk} = \frac{1}{f_{ozv}^2} \frac{V_{m,ekv} + V}{V_{m,ekv} V} 3,55 \cdot 10^6 \quad [\text{kg/m}^4; l, \text{Hz}] \quad (7.50)$$

potřebná mechanická hmotnost membrány tedy bude

$$m_{m,mech} = m_{m,celk} S_m^2 \quad (7.51)$$

Je-li původní mechanická hmotnost membrány $m_{m,mech}$ je nutno na ni přidat závaží o hmotnosti

$$m_{plid} = m_{m,mech} - m_{m,m} \quad (7.52)$$

Pomocná membrána má mít co největší poddajnost (co nejnižší rezonanční kmitočet), aby se poměr m_m/m_1 co nejvíce blížil čtverci podílu f_d/f_{ozv} :

$$\frac{m_m}{m_1} \rightarrow (\frac{f_d}{f_{ozv}})^2$$

Aplikace pomocné membrány je na místě v takovém případě, kdy u klasické bass-reflexové jednotky vychází příliš malý průměr nebo příliš velká délka nátrubku, případně nadmerná rychlosť vzduchu v nátrubku.

Jako příklad určíme základní rozměry bass-reflexové ozvučnice a potřebné údaje k její realizaci opět pro reproduktor ARN 5604 (pro nějž již byla navržena v předešlé kapitole klasická bass-reflexová ozvučnice). Předpokládáme přitom, že jako pomocná membrána bude použit stejný typ membrány (včetně poddajného uložení) jako u reproduktoru ARN 5604 ($V_{ekv} = 45 \text{ l}$, $m_m = 40 \text{ (7,8 g)}$).

Nejdříve určíme rezonanční kmitočet ozvučnice

$$f_{ozv} = \frac{0,4}{0,42} = 33,3 \text{ Hz}$$

Pro zvolený dolní mezní kmitočet $f_d = 50 \text{ Hz}$ je nutný objem ozvučnice

$$V = \frac{3,55 \cdot 10^6}{50^2 \cdot 64} = 22,1 \text{ l.}$$

Celková akustická hmotnost membrány se získá dosazením do rovnice (7.48):

$$m_m = \frac{1}{33,3^2} \frac{45+22,1}{45 \cdot 22,1} \cdot 3,55 \cdot 10^6 = 215 \text{ kg/m}^4$$

$$\text{Poměr } \frac{m_m}{m_1} = \gamma_1 = \frac{215}{64} = 3,36.$$

Pomocná membrána musí mít mechanickou hmotnost

$$m_{mech} = m_{m,mech} S_m^2 = 215 \cdot (1,4 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 10^3 \text{ g} = 42 \text{ g.}$$

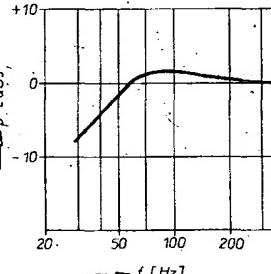
Její původní hmotnost 7,8 g nutno tedy zvětšit na potřebnou velikost závažím 34,3 g.

Konečně určíme dosazením do vztahu (7.42) velikost μ ,

$$\mu = \frac{f_{ozv}}{f_{m,rez}} = \sqrt{\frac{45+22,1}{22,1}} = 1,74. \quad \text{Rezonanční kmitočet samotné pomocné membrány bude tedy } f_{m,rez} = 19,1 \text{ Hz} \left(= \frac{33,3}{1,74} \right).$$

Pro vyzařovací jednotku lze stanovit dosazením do vztahu 7.45 výsledný kmitočtový průběh, který je pro daný případ na obr. 7.18.

Pro úplnost si zkonzolujeme amplitudu pomocné membrány při dolním mezním kmitočtu, při němž původní předpokládaná hladina akustického tlaku



Obr. 7.18. Kmitočtový průběh vyzařovací jednotky s bass-reflexovou ozvučnicí s pomocnou membránou; $f_{ozv} = 33,3 \text{ Hz}$, $V = 22,1 \text{ l}$, $m = 215$, $\mu = 1,74$, rezonanční kmitočet pomocné membrány 19,1 Hz

94 dB se sníží jednak vlivem kmitočtového průběhu o 1,5 dB, a jednak, bere-li se v úvahu pokles hladiny přirozeného signálu o 0,9 dB, na 91,6 dB, čili na $p = 0,76 \text{ Pa}$. Protože pro 50 Hz je $q = \frac{50}{33,3} = 1,5$, bude podle rovnice (7.46) výhyla

$$240 \cdot 0,76 = 2,7 \text{ mm},$$

což je přijatelné. Při 40 Hz bude výhyla membrány při výsledném akustickém tlaku sníženém vlivem poklesu kmitočtové charakteristiky (o 7 dB) a poklesu vlivem spektra přirozeného signálu (viz obr. 7.14) menší o dalších 2,1 dB – tedy celkem o 9,1 dB –

$$240 - 0,35 = 2,5 \text{ mm.}$$

Ze srovnání s kmitočtovým průběhem vyzařovací jednotky s klasickou bass-reflexovou ozvučnicí se stejným dolním mezním kmitočtem a o stejném objemu (viz obr. 7.15) je patrné, že se, pokud jde o přenosové vlastnosti, obě jednotky téměř neliší. Výrobek je ovšem jednotka s pomocnou membránou náročnější.

8. Reproduktorové soustavy

Protože s ohledem na dosažitelné vlastnosti známých elektroakustických měničů nelze zkonstruovat jednotku s jediným měničem, která by měla vyhovující přenosové vlastnosti (dostatečnou citlivost a vyzářený akustický výkon, vyhovující kmitočtovou charakteristiku a směrové vlastnosti, malé nelineární a intermodulační zkreslení), řeší se jednotky určené pro kvalitní reprodukci akustického signálu jako několikapásmové. Jsou v nich použity dva, tři, v krajním případě i čtyři elektroakustické měniče, jejichž přenášeňa kmitočtová pásmá na sebe navazují.

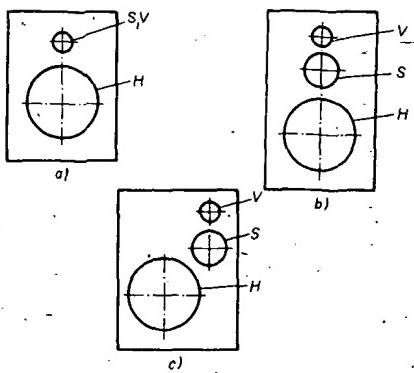
Dílčí elektroakustické měniče musí být řešeny a rozmištěny tak, aby výsledná kmitočtová charakteristika soustavy byla vyrovnána a to nejen v osé, ale i ve směrech mimo osu soustavy a to při minimálním možném nelineárním i zámkovém zkreslení. Aby toho bylo dosaženo je nutné, aby jednotlivé zářiče, jejichž kmitočtová pásmá na sebe navazují, byly umístěny co nejbližše u sebe. Pokud se použijí přímozařujicí reproduktory je vhodné, aby při dělicím kmitočtu f_d (kmitočtu, při němž oba zářiče využívají přibližně stejný akustický výkon), byl obvod membrány zářiče o větším průměru membrány nejvýše roven délce vlny při tomto dělicím kmitočtu.

Tuto podmíinku lze vyjádřit vztahem

$$f_d \leq \frac{c_0}{\pi D}. \quad (8.1)$$

Vzdálenost středů membrán obou zářičů má být, jak již bylo řečeno, minimální.

Obvyklé uspořádání jednotlivých reproduktorů soustavy je na obr. 8.1. Optimalní je směrová charakteristika takto uspořádaných soustav ve vodorovné rovině, kdy odpovídá v podstatě směrové charakteristice jednotlivých zářičů. Ve vertikální rovině vznikají, podle vzdálenosti sousedních zářičů, na směrové charakteristiky při určité odchylce od osy soustavy minima a to obvykle v oblasti dělicího kmitočtu. Tato minima jsou méně



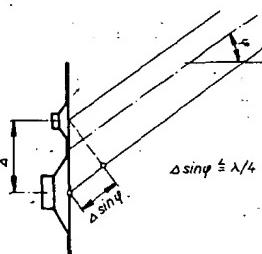
Obr. 8.1. Účelné uspořádání zářičů několikapásmových reproduktoričkových soustav (zářice mohou být umístěny i mísne excentricky). a) dvoupásmová soustava, b., c) třípásmové soustavy (H hlubokotónový, S středotónový a V vysokotónový reproduktor)

význačná při malé vzdálenosti dílčích zářic.

Při aplikaci reproduktoriček, u nichž je akustický tlak v blízkém poli ve fází s jejich svorkovým napětím (což platí obvykle v oblasti nižších kmitočt), nemá být vzdálenost Δ středů membrán současně se uplatňujících reproduktoriček větší než

$$\Delta \leq \frac{c_0}{4f_d \sin \varphi} = \frac{\lambda}{4 \sin \varphi} \quad (8.2)$$

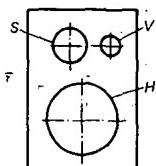
kde c_0 je rychlosť šíření zvuku, f_d dělící kmitočet a φ úhel mezi osou zářice a směrem, v němž ještě požadujeme vyrovnaný kmitočtový průběh (viz obr. 8.2). Tuto podmínku lze obvykle snadno splnit u hlubokotónové a středotónové jednotky, obtížněji u středotónové a vysokotónové.



Obr. 8.2. Určení maximální vzdálenosti hlubokotónového (středotónového) a vysokotónového reproduktoru

Podobné zásady platí i v případě, kdy jsou aplikovány nepřímovyzářující reproduktory.

Uspořádání vyzářovacích jednotek podle obr. 8.3, které se také někdy používá,



Obr. 8.3. Uspořádání středotónového a vysokotónového reproduktoru vedle sebe (méně výhodné s ohledem na směrové vlastnosti ve vodorovné rovině)

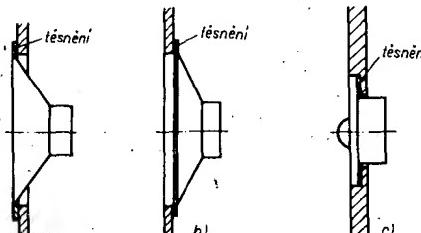
vá, je nevhodné proto, že směrová charakteristika v horizontální rovině je vyhovující při menších odchylkách od osy než v rovině vertikální.

Reproduktořové soustavy se řeší buď s výhybkami na „výkonové straně“ budího signálu (takzvaná pasivní výhybka), kdy je napojena celá soustava z výstupu jediného výkonového zesilovače, nebo, u takzvaných aktivních soustav, na vstupní straně dílčích výkonových zesilovačů, napájejících jednotlivé zářiče. Vždy je nutno dbát na to, aby i v oblasti dělících kmitočtů byl kmitočtový průběh soustavy pokud možno kmitočtově nezávislý.

Skříň reproduktoričkových soustav, které se uplatňují jako ozvučnice, musí mít tuhé stěny, které nesmí při činnosti reproduktoriček spoluškmitat tak, aby se jimi vyzářená akustická energie významněji podílela na energii vyzářené reproduktorem. Kvalita reprodukce není rušivě ovlivněna, má-li hladina signálu vyzářeného kmitajícími stěnami ozvučnice v místě posluchače relativně úroveň alespoň o 12 dB nižší než hladina signálu vyzářeného reproduktorem, případně jinou částí ozvučnice (například otvorem hrdla bass-reflexové ozvučnice, či pomocnou membránou).

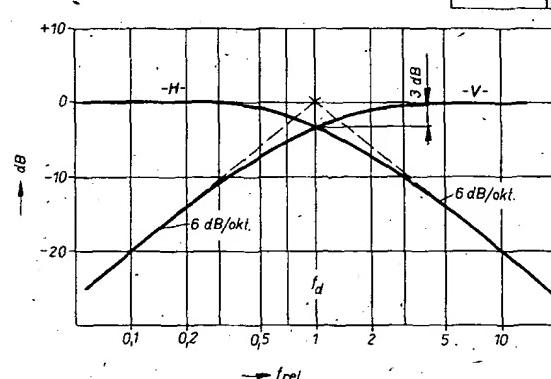
Reproduktoři musí být montovány tak, aby přední strana jejich membrány pokud možno lícovala s plochou stěny ozvučnice, v níž jsou umístěny. To se týká zejména reproduktoriček středotónových a vysokotónových. U hlubokotónových reproduktoriček musí být zmíněná zásada dodržena u dvoupásmových soustav.

Správná montáž reproduktoru na přední stěnu ozvučnice je znázorněna na obr. 8.4. Tato montáž má i tu přednost, že se snadněji prakticky realizuje.



Obr. 8.4. Uspořádání reproduktoriček na přední stěně ozvučnice; a) hlubokotónový a středotónový reproduktor, b) hlubokotónový reproduktor, c) vysokotónový reproduktor

Ozvučnice zásadně musí být dokonale utěsněny. To se ovšem týká i samotného reproduktoru (proto se u moderních hlubokotónových reproduktoriček zakrývá středový otvor membrány s kmitací cívkou kopulkou). Dokonalé těsnění je zejména důležité u bass-reflexových ozvučnic.



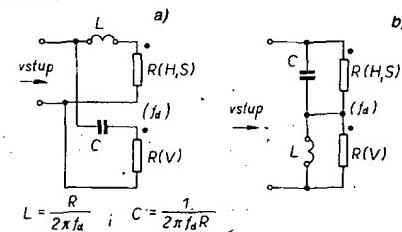
Obr. 8.5a. Kmitočtové průběhy napětí na svorkách hlubokotónového a vysokotónového reproduktoru, je-li jejich vstupní impedance čistě činná

8.1 Výhybky reproduktoričkových soustav napájených z jediného výkonového zesilovače

Výstupní signál výkonového zesilovače se u dvoupásmových vyzářovacích soustav přivádí na jednotlivé jejich jednotky přes pasivní filtry, propouštějící pro příslušnou jednotku signály v kmitočtovém pásmu, které je schopna optimálně zpracovat. V běžné praxi se používají výhybky prvého, druhého a výjimečně i třetího řádu, vzácně řádu výšších. Rád výhybky udává kmitočtový průběh výhybky v oblasti, kdy se uplatňuje její útlum. (Výhybka 1. řádu způsobuje pokles 6 dB/okt, výhybka 2. řádu 12 dB/okt a výhybka 3. řádu 18 dB/okt.)

8.1.1 Výhybky prvního řádu

Výhybky prvního řádu jsou výhodné proto, že se u nich neuplatňují nežádoucí zákmotové jevy. Lze je však použít pouze ve spojení s kvalitními reproduktory o velmi vyrovnané kmitočtové charakteristice. Tento druh výhybky je na obr. 8.5 pro dvoupásmovou reproduktoričkovou soustavu a na obr. 8.6 pro soustavu třípásmovou. Výhybky podle a) i b) mají stejné vlastnosti.

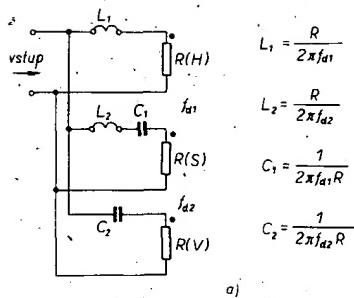


Obr. 8.5. Uspořádání výhybek prvního řádu pro dvoupásmovou reproduktoričkovou soustavu

Je-li jmenovitá impedance reproduktoriček R , mají pro dělící kmitočty f_d a f_{d2} prvky výhybky hodnoty uvedené v tab. 5. Kmitočtové průběhy jednotlivých částí výhybek jsou na obr. 8.5a a obr. 8.6b.

Tab. 5.

Dělící kmitočet	L	C	Poznámka
f_d	$\frac{R}{2\pi f_d}$	$\frac{1}{2\pi f_d R}$	dvoupásmová soustava
f_{d1}	$\frac{R}{2\pi f_{d1}}$	$\frac{1}{2\pi f_{d1} R}$	třípásmová soustava
f_{d2}	$\frac{R}{2\pi f_{d2}}$	$\frac{1}{2\pi f_{d2} R}$	



$$L_1 = \frac{R}{2\pi f_{d1}}$$

$$L_2 = \frac{R}{2\pi f_{d2}}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{d1} R}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_{d2} R}$$

Pro správnou funkci výhybek tohoto typu je nezbytné, aby v oblasti dělicího kmitočtu byla vstupní impedance reproduktoru čistě reálná. Pokud tato základní podmínka není splněna, je funkce výhybek nevyhovující. Na tuto skutečnost nutné brát zřetel. Pokud jsou použity běžné reproduktory, u nichž se s rostoucím kmitočtem vlivem indukčnosti kmitací cívky zvětšuje i jejich vstupní impedance, je nezbytné opatřit je pomocným paralelním obvodem se sériovou kombinací odporu a kondenzátoru, který úpraví vstupní impedanci reproduktoru tak, že je kmitočtově téměř nezávislá (viz kapitola 5). Tato úprava se týká hlubokotónového a středotónového reproduktoru v oblasti dělicího kmitočtu.

S ohledem na správnou funkci výhybky je také nutné, aby rezonanční kmitočet středotónového a vysokotónového reproduktoru byl vždy dostatečně „hluboký“ pod dělicím kmitočtem (více než 2 oktavy!).

Významnou vlastností výhybky prvního řádu je skutečnost, že za ideálních podmínek je vstupní impedance stejně jako výsledná kmitočtová charakteristika, měřená na akustické straně, kmitočtově nezávislá. Polarita všech použitých měničů musí být stejná.

Z uvedeného je patrné, že s ohledem na mimořádně striktní požadavek konstantní zatěžovací impedance použitých filtrů a na nutnost aplikovat reproduktory o vyrovnaném kmitočtovém průběhu v okolí dělicích kmitočtů je použitelnost těchto jednoduchých výhybek omezená.

8.1.2 Výhybky druhého řádu

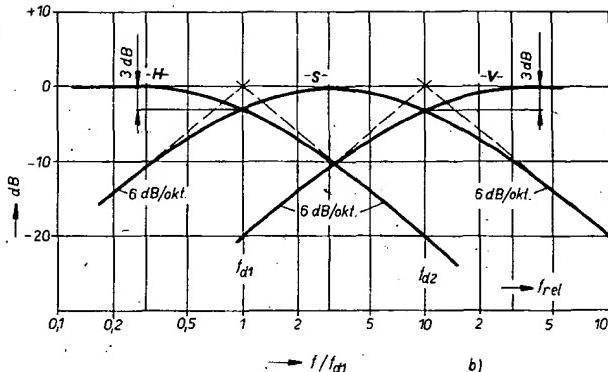
V praxi se nejčastěji používají výhybky druhého řádu, které jsou schematicky znázorněny na obr. 8.7 a obr. 8.8 (výhybka pro dvoupásmovou a třípásmovou reproduktoru soustavu).

Indukčnosti cívek a kapacity kondenzátorů pro dané dělicí kmitočty jsou uvedeny v tab. 6.

Je-li dělicí kmitočet f_d v oblasti, v níž je impedance hlubokotónového reproduktoru jen málo závislá na kmitočtu, není nutné aplikovat u něj obvod pro korigování průběhu impedance. To platí obvykle pro hlubokotónové reproduktory, je-li dělicí kmitočet nižší než 500 až 600 Hz.

U středotónového reproduktoru bývá však prvek pro vyrovnaní vstupní impe-

Obr. 8.6. Uspořádání výhybek prvního řádu pro třípásmovou reproduktoru soustavu. (a) a jejich kmitočtové průběhy (platné pro čistě činnou zátěž jejich výstupních svorky)



zem i pro středotónový a vysokotónový reproduktor a to také v oblasti dolního mezního kmitočtu, který musí být volen alespoň o 1 oktavu výše, než je jeho rezonanční kmitočet. V oblasti horního dělicího kmitočtu středotónového reproduktoru díky vyrovnaní jeho vstupní impedance žádné problémy nevznikají.

Při pripojení reproduktoru na výstupní svorky výhybek je nutno mít na zřetel, že v oblasti dělicího kmitočtu je fáze výstupních napětí opačná, takže je třeba navázat, reproduktory přepolovat (středotónový reproduktor musí mít opačnou polaritu než reproduktor hlubokotónový). To též platí i pro horní dělicí kmitočet f_{d2} . V této oblasti se však obvykle vzhledem k velké indukční složce vstupní impedance středotónového reproduktoru (anebo hlubokotónového reproduktoru ve dvoupásmové soustavě) natáčí fáze akustického tlaku před membránou reproduktoru při současném natočení fáze vysokotónového reproduktoru v opačném směru; takže často přepolování není nutné. To se týká například soustavy se středotónovým reproduktorem ARZ 4604/8 a vysokotónovým ARV 3604/8. V každém případě je nezbytné zkontrolovat správnost fazování a to kontrolou kmitočtové charakteristiky, která v oblasti dělicího kmitočtu (i mimo něj) nesmí mít nežadoucí zvlnění, případně ostré minimum.

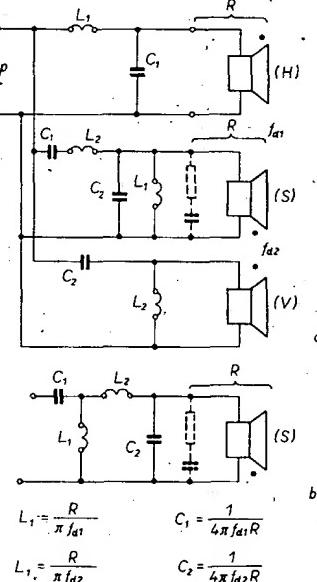
Kmitočtové průběhy napětí měřených na jednotlivých reproduktorech jsou na obr. 8.9 a 8.10.

Vstupní impedance celé soustavy je v oblasti dělicích kmitočtů zhruba až dvojnásobná oproti jmenovité velikosti, což však při použití zesilovače o malé výstupní impedance (která je dnes obvyklá) nevadí.

Vše, co zde bylo řečeno, platí však pouze při dostatečně malém odporu použitých tlumivek (činný odpor tlumivky nemá být pokud možno větší než 1/10 jmenovité impedance použitých reproduktorů).

Předností výhybek druhého řádu je jejich, ve většině případů vyhovující průběh útlumu, poměrná jednoduchost a vyhovující průběh vstupní impedance soustavy. Nevhodou ovšem je to, že jejich správná činnost vyžaduje zatížit jejich výstupní svorky reálnou impedancí správné velikosti. Jako příklad je uveden výpočet klasické výhybky druhého řádu pro reproduktory ARN 567 a ARV 081.

Vychází se z grafu na obr. 8.11, z něhož je patrný průběh impedance hlubokotónového reproduktoru a průběh její reálné (Z_{re}) a imaginární (Z_i) složky. Dělicí kmitočet f_d nechť je 2,5 kHz.



$$L_1 = \frac{R}{\pi f_{d1}}$$

$$C_1 = \frac{1}{4\pi f_{d1} R}$$

$$L_2 = \frac{R}{\pi f_{d2}}$$

$$C_2 = \frac{1}{4\pi f_{d2} R}$$

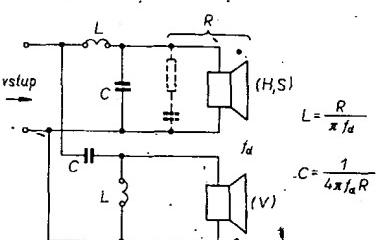
Obr. 8.8. Výhybky druhého řádu pro třípásmovou reproduktoru soustavu (a) a s modifikovaným zapojením (b) pro středotónový reproduktor

Tab. 6.

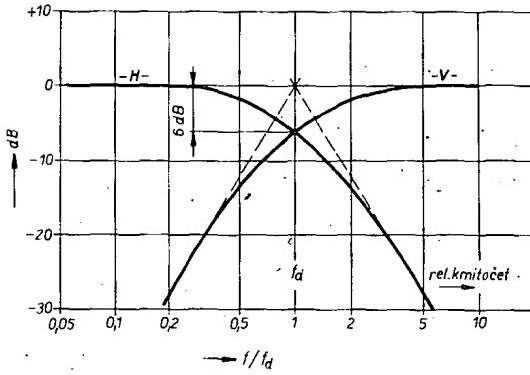
Dělicí kmitočet	L_1	L_2	C_1	C_2	Poznámka
f_d	$\frac{R}{\pi f_d}$		$\frac{1}{4\pi f_d R}$	-	dvoupásmová soustava
f_{d1}	$\frac{R}{\pi f_{d1}}$		$\frac{1}{4\pi f_{d1} R}$		třípásmová soustava
f_{d2}		$\frac{R}{\pi f_{d2}}$		$\frac{1}{4\pi f_{d2} R}$	

dance vždy zcela nezbytný. Totéž platí pro hlubokotónový a středotónový reproduktor dvoupásmové reproduktorské soustavy podle obr. 8.7.

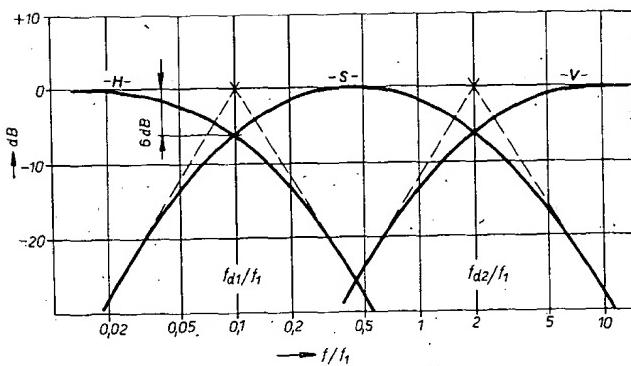
Jak již bylo řečeno, důležitou podmínkou pro správnou činnost klasické výhybky je požadavek, že její výstupní svorky musí být zatíženy konstantní a to pokud možno čistě reálnou impedancí. Pokud tato podmínka není splněna, liší se skutečný kmitočtový průběh výhybky od původně předpokládaného (teoretického) velmi značně. Velmi často je nutné volit dělicí kmitočty s ohledem na kmitočtový průběh dělicích reproduktori. Tak u hlubokotónového reproduktoru (pokud se nepoužije obvod pro vyrovnaní vstupní impedance) je třeba volit dělicí kmitočet v oblasti, v níž se vstupní impedance reproduktoru nezvětšuje o více než 10 až 20 % jmenovité velikosti. Totéž platí ov-



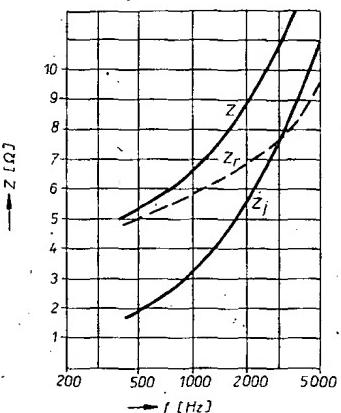
Obr. 8.7. Výhybky druhého řádu pro dvoupásmovou reproduktorskou soustavu



Obr. 8.9. Kmitočtový průběh výstupního napětí klasické výhybky druhého řádu podle obr. 8.7



Obr. 8.10. Kmitočtový průběh výstupního napětí klasické výhybky druhého řádu pro třípásmovou soustavu podle obr. 8.8



Obr. 8.11. Průběh vstupní impedance hlu- bokotónového reproduktoru ARN 567 v oblasti dělicího kmitočtu dvoupásmové reproduktarové soustavy ($Z = Z_r + jZ_j$)

Prvek pro vyrovnání vstupní impedance se skládá z rezistoru 5Ω a kondenzátorem 30 až $33\mu\text{F}$. (Je použit elektrolytický kondenzátor pro napětí 25 V); L a C se stanoví ze základních rovnic

$$L = \frac{R_v}{\pi f_d} = \frac{4}{\pi \cdot 2500} = 0,51 \text{ mH},$$

$$C = \frac{1}{4\pi f_d R_v} = \frac{1}{4\pi \cdot 2500 \cdot 4} \approx 8 \mu\text{F}.$$

Kmitočtové průběhy svorkových napětí obou reproduktorů a schéma výhybky jsou na obr. 8.12.

8.1.3 Modifikovaná výhybka druhého řádu

U jednoduchých a levnějších dvoupásmových reproduktarových soustav se v některých případech používají výhybky řešené tak, aby uspokojivě pracovaly i ve spojení s reproduktorem bez vykompenzované vstupní impedance. Zapojení, které je krajně jednoduché, je na obr. 8.13. Podobné uspořádání lze ovšem aplikovat i u vícepásmových soustav.

U tohoto uspořádání mají obě cívky různé indukčnosti a podobně i kondenzá-

tory různé kapacity. Exaktní způsob pro výpočet potřebných součástí výhybky neexistuje – při řešení je nutno postupovat pouze experimentálně.

Vychází se z průběhu impedance reproduktoru použitého ve výhybce, u něhož musí být znám průběh reálné i imaginární složky jeho vstupní impedance v okolí zvoleného dělícího kmitočtu f_d (obr. 8.11). Jde o průběh vstupní impedance Z tohoto reproduktoru a jeho reálné Z_m i imaginární Z_j složky.

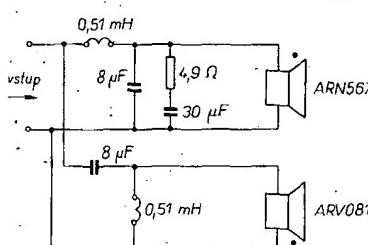
Při návrhu výhybky se postupuje tak, že se pro zvolený dělící kmitočet f_d stanoví absolutní hodnota impedance reproduktoru Z_d a reálná složka této impedance $Z_{re,d}$ a určí se podíl dělícího kmitočtu f_d a rezonančního kmitočtu f , obvodu L_1, C_1

$$\frac{f_d}{f_r} = \chi_d = \sqrt{1 + \sqrt{2}} \frac{Z_d}{Z_{re,d}} \quad (8.3).$$

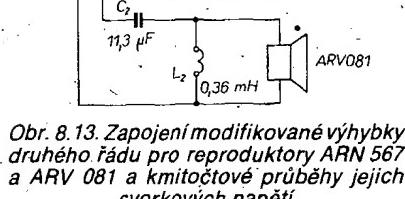
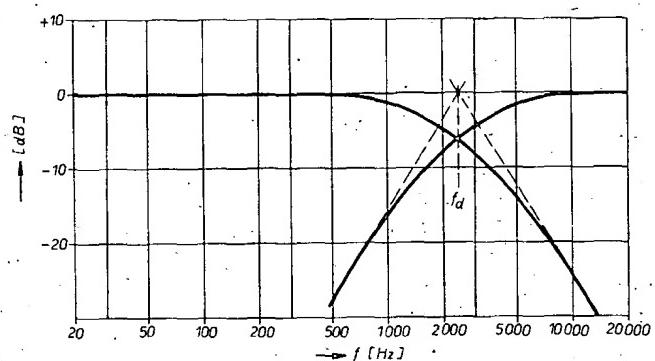
Indukčnost L_1 se určí ze vztahu

$$L_1 = Z_{re,d} \frac{\chi_d^2 - 1}{2\pi f_d} \quad [\text{H; } \Omega, \text{Hz}] \quad (8.4)$$

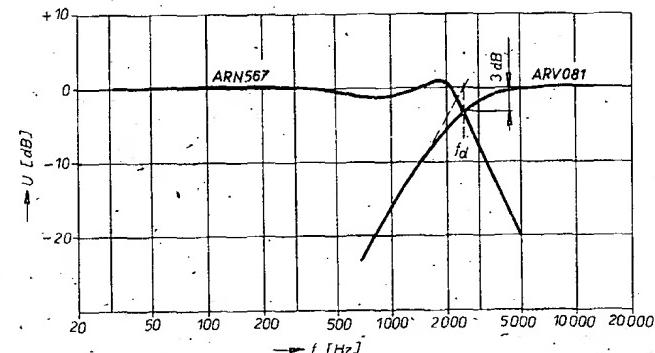
a kapacita C_1



Obr. 8.12. Zapojení klasické výhybky druhého řádu pro reproduktory ARN 567 a ARV 081 a průběh napětí na svorkách reproduktorů



Obr. 8.13. Zapojení modifikované výhybky druhého řádu pro reproduktory ARN 567 a ARV 081 a kmitočtové průběhy jejich svorkových napětí



$$C_1 = \frac{10^6}{(2\pi f_d)^2 L} \quad [\mu F; Hz, H] \quad (8.5)$$

Rezonanční kmitočet článku $L_1 C_1$ je dán přímo výrazem

$$f_r = \frac{f_d}{x_d} \quad (8.6)$$

Popsaný postup lze aplikovat, je-li

$$0,85 \leq \frac{\omega L_1}{Z} \leq 1,2 \quad (8.7)$$

(Z je impedance reproduktoru při kmitočtu f_r).

Induktance L_2 a kapacita C_2 pro vysokotónový reproduktor se určí ze vztahů

$$L_2 = \frac{Z_v \sqrt{2}}{2\pi f_d} \quad [H; \Omega, Hz] \quad (8.8)$$

$$C_2 = \frac{10^6}{2\pi f_d \sqrt{2} Z_v} \quad [\mu F; Hz, \Omega] \quad (8.9)$$

kde Z_v je jmenovitá impedance vysokotónového reproduktoru.

Zmíněný druh výhybky není příliš výhodný, protože kapacita kondenzátoru C_1 vychází příliš veliká (což je na závadu při použití svitkových kondenzátorů). V každém případě lze doporučit aplikaci klasické výhybky i za cenu nutnosti zařadit pomocný korekční obvod RC pro vyvažování vstupní impedance hlubokotónového reproduktoru. Pomocný kondenzátor, jehož kapacita není příliš kritická, může být elektrolytický.

Jako příklad je uveden výpočet modifikované výhybky L, C pro reproduktory ARN 564 a ARV 081.

Z průběhu impedance hlubokotónového reproduktoru (obr. 8.11) zjistíme jeho impedanci při 2,5 kHz ($Z_d = 10 \Omega$) a reálnou složku této impedance ($Z_{re, d} = 7,25 \Omega$). Pomocná veličina

$$x_d = \sqrt{1 + \sqrt{2}} \frac{10}{7,25} = 1,72$$

a rezonanční kmitočet obvodu L_1, C_1

$$f_r = \frac{f_d}{x_d} = \frac{2500}{1,72} = 1,46 \text{ kHz}$$

Tlumivka musí mít indukčnost

$$L_1 = 6,8 \frac{1,72^2 - 1}{2\pi \cdot 2500} \cdot 10^3 = 0,85 \text{ mH}$$

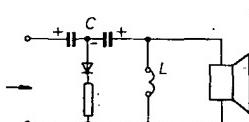
Kapacita

$$C_1 = \frac{10^6}{(2\pi \cdot 1460)^2 \cdot 0,85 \cdot 10^{-3}} = 14 \mu F$$

Zbývající prvky obvodu pro vysokotónový reproduktor budou

$$L_2 = \frac{4,2}{2\pi \cdot 2500} = 0,36 \text{ mH}$$

$$C_2 = \frac{10^6}{2\pi \cdot 2500 \cdot \sqrt{2} \cdot 4} = 11,3 \mu F$$



Obr. 8.14. Výhybka pro vysokotónový reproduktor s elektrolytickými kondenzátory opatřená pomocným prvkem pro vytvoření polarizačního napětí

Schéma výhybky je na obr. 8.13. Ze srovnání s klasickou výhybkou o stejném dělicím kmitočtu je patrné, že výhybka modifikovaná vyžaduje kondenzátory větších kapacit, což je, pokud se používají kondenzátory svitkové, nevhodné.

8.2 Prvky pasivních výhybek pro napájení reproduktoru

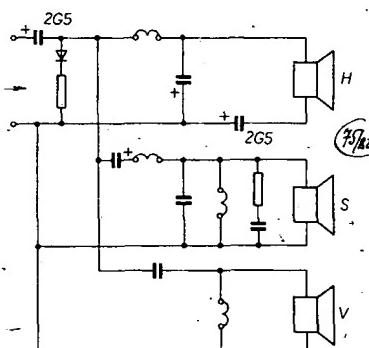
8.2.1 Kondenzátory

Kondenzátory o potřebných kapacitách se obvykle skládají ze svitkových kondenzátorů typu MP. S ohledem na rozložení a provozní podmínky je účelné používat kondenzátory na co nejmenší provozní napětí. V zahraničí se vyrábějí pro daný účel zcela ideální svitkové kondenzátory s metalizovaným dielektrikem z extrémně tenkých polymerových fólií, obvykle mylarových.

Bez obtíží lze však použít i kondenzátory elektrolytické, nejlépe bipolární. Pokud takové nejsou k dispozici, lze aplikovat dva běžné elektrolytické kondenzátory stejného typu o stejné kapacitě, které jsou zapojeny v sérii s opačnou polaritou. S ohledem na prodloužení doby jejich života je vhodné přivést do jejich společného bodu polarizační napětí, které lze jednoduše získat usměrněním budicího signálu. Takové jednoduché uspořádání je na obr. 8.14, na němž je jednoduchá výhybka vysokotónového reproduktoru. Diodou usměrněný budicí signál vytváří potřebné stejnosměrné předpětí pro oba kondenzátory. Rezistor zapojený v sérii s usměrnovačem omezuje proud, který vznikne při připojení signálu. Vzhledem k tomu, že nabijecí proud kondenzátorů je nepatrný, může se použít rezistor pro zatížení okolo 0,1 W.

V krajním případě lze použít i jednoduché elektrolytické kondenzátory, určené na 5 až 10násobné napětí, než které na nich může vytvářit přiváděný signál.

Zvláště příznivá situace nastane, jsou-li v obvodu výhybky sériové elektrolytické kondenzátory, které chrání reproduktoru soustavu před nežádoucím stejnosměrným proudem, který může proniknout ze zesilovače. Pak postačí pro vytvoření polarizačního napětí pro celou soustavu jediný usměrnovač (obr. 8.15).



Obr. 8.15. Výhybka pro třípásmovou reproduktorskou soustavu s elektrolytickými kondenzátory a obvodem pro vytvoření polarizačního napětí na nich

Použíli by se pro výhybky elektrolytické kondenzátory, je nutné mít na zřeteli, že jimi při činnosti soustavy protékají poměrně velké proudy. Aby se kondenzátory nezahřívaly, musí být jejich sériový odpor co nejmenší – je ho proto účelné kontrolovat před vestavěním kondenzátoru do výhybky, zejména u soustav o značných příkonech. V takových případech je vhod-

né s ohledem na zmenšení ztrát v kondenzátoru zařadit několik kondenzátorů paralelně.

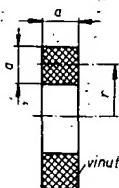
Odpor kondenzátoru lze nejsnáze zkontrolovat tak, že se zjistí jeho impedance v oblasti vysokých kmitočtů (asi při 15 až 20 kHz), kdy je již reaktance kondenzátoru zanedbatelně malá. Sériový odpor elektrolytického kondenzátoru nemá být větší než 0,1 až 0,3 Ω.

8.2.2 Tlumivky

Odpor vinutí tlumivek použitých ve výhybkách má být minimální a nemá překročit 1/10 jmenovité impedance použitého reproduktoru.

Vzduchové cívky, které se často ve výhybkách používají, mají obvykle velmi značná rozložení a hmotnost a to i tehdy, zvolili by se jejich rozložení tak, aby potřeba mědi byla co nejmenší. Vzhledem k rozložení a hmotnosti cívky nebývá proto obvykle splněna podmínka o potřebném odporu vinutí cívky. Často bývá jejich odpor až dvojnásobný, což nežádoucí způsobem ovlivňuje kmitočtový průběh výhybek a citlivost soustavy (příliš velký odpor mívá obvykle tlumivku ve výhybce hlubokotónového reproduktoru, což mnohdy ovlivní nepříznivě i kmitočtový průběh celé soustavy právě v kmitočtové oblasti, kde je to nejméně vhodné).

Vzduchová cívka s minimální hmotností má mít rozložení podle obr. 8.16. Délka hrany řezu cívky má být $r = 0,68r$, kde r je střední poloměr cívky.



Obr. 8.16. Rozměry úsporné vzduchové tlumivky

Indukčnost takové cívky o n závitech je

$$L = 1,68 \cdot 10^{-5} r n^2 \quad [\text{mH}; \text{cm}] \quad (8.10)$$

a průměr d použitého vodiče

$$d = \frac{0,68r}{\sqrt{\pi k}} \quad [\text{mm}; \text{cm}, -] \quad (8.11)$$

kde k je plnění cívky o průřezu S_c :

$$k = \frac{S_c}{d^2 n} \quad (8.12)$$

k pro lakované vodiče o průměru větším než 0,5 mm je 1,3 až 1,4.

Při návrhu vzduchové tlumivky se vychází z požadované indukčnosti L [mH] a zvoleného odporu vinutí R [Ω].

Střední poloměr r takové cívky vinuté měděným lakovaným vodičem je

$$r = 1,322 \sqrt{\frac{L}{R}} k \quad [\text{cm}; \text{mH}, \Omega] \quad (8.13)$$

průměr vodiče d

$$d = 0,435 \sqrt[4]{r^5 / (k^2 L)} \quad [\text{mm}; \text{cm}, \text{mH}] \quad (8.13)$$

a počet závitů n

$$n = 244 \sqrt{L/r} \quad [-; \text{mH}, \text{cm}] \quad (8.15)$$

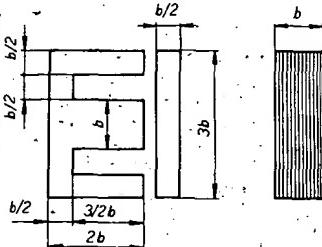
Hmotnost takové cívky pak je

$$m = 47 \sqrt{(L/R)^3 k} \quad [\text{g}; \text{mH}, \Omega] \quad (8.15)$$

Vzduchové cívky jsou, jak již bylo řečeno, velmi rozdílné a materiálově náročné (i když se místo měděného vodiče použije vodič hliníkový). Mnohem výhodnější jsou cívky s jádry zhotovenými z magnetického vodivého materiálu.

Jádra ovšem nutno dimenzovat tak, aby se při provozu nepresytila a aby indukčnost cívky nebyla závislá na přiloženém střídavém napětí a kmitočtu.

Pokud se použije jádro z transformátorových plechů typu EI o čtvercovém průřezu sloupku a co nejmenší tloušťce ple-



Obr. 8.17. Rozměry jader EI

chů, postupuje se při návrhu cívky takto: ze vzorce

$$b = 3,71 \sqrt{\frac{L}{R}} \quad [\text{mm; mH, } \Omega] \quad (8.17)$$

se určí přibližná šířka b sloupku jádra v mm a zvolí se nejbližší větší šířku podle ČSN (viz například [19]) a tab. 7.

Vzduchová mezera δ má být

$$\delta = b - 0,1 \quad [\text{mm}]$$

(vložka vymezující vzduchovou mezitu má ovšem tloušťku poloviční, protože jádro je přerušeno mezerou dvakrát!).

Přibližný počet závitů n je dán vztahem

$$n = 282 \sqrt{\frac{L}{b}} \quad [-; \text{mm, mH, mm}] \quad (8.18)$$

a přibližný průměr vodiče

$$d = \frac{0,87b}{\sqrt{n}} \quad [\text{mm; mm, } -] \quad (8.19)$$

Hmotnost potřebné mědi bude

$$m = 4,19 \cdot 10^{-2} n d^2 b \quad [\text{g; -, mm, mm, mm}] \quad (8.20)$$

a skutečný odpor vinutí

$$R = 1,3 \cdot 10^{-4} \frac{nb}{d^2} \quad [\Omega; -, \text{mm, mm}] \quad (8.21)$$

Závěrem je nutné zkontrolovat sycení jádra, které u výhybky prvního řádu určené pro hlubokotónový reproduktor bude

$$B = 0,255 \frac{U}{f_d S_p} \quad [\text{T; V, Hz, m}^2] \quad (8.22)$$

kde U je maximální vstupní napětí přivedené na vstup soustavy, f_d dělící kmitočet hlubokotónové jednotky, S_p plocha jádra [m^2] a n počet závitů vinutí, což lze přepsat na vztah

$$B = \frac{U}{f_d b^2 n} \cdot 2,25 \cdot 10^6 \quad [\text{T; Hz, mm, } -] \quad (8.23)$$

U výhybky druhého řádu je sycení

$$B = 0,45 \frac{U}{f_d S_p n} \quad [\text{T; V, Hz, m}^2, -] \quad (8.24)$$

čili

$$B = \frac{U}{f_d b^2 n} \cdot 4,5 \cdot 10^5 \quad [\text{T; Hz, mm, } -] \quad (8.25)$$

Sycení, které je účelné pro jistotu kontrolovat, nemá být u jádra složeného z transformátorových plechů větší než 0,6 T. Při popsaném dimenzování jádra je velmi pravděpodobné, že tato podmínka bude splněna.

Cívky s jádem z transformátorových plechů jsou vhodné zejména pro výhybky hlubokotónových reproduktorů tří-pásmovej soustav, kde jsou nezbytné velké indukčnosti (jednotky až desítky mH). Pro ostatní druhy výhybek jsou podstatně výhodnější cívky s feritovými jádry, o nichž bude zmínka dále. Pro amatérské účely, kdy se jedná o zhotovení jen několika tlumivek a úspora mědi nehraje takovou roli a cívky mají indukčnost menší 1 mH, vyhoví ovšem cívky vzduchové.

Tab. 7. Rozměry transformátorových plechů EI vhodných pro tlumivky výhybek

b [mm]	10	12	16	20	25	32	40
S_p [cm ²]	1	1,44	2,56	4	6,25	10	16

Při hromadné výrobě reproduktoru soustav, při níž má úspora mědi rozhodující význam, jsou cívky s feritovými jádry mimořádně účelné. Jejich aplikace přináší pronikavou úsporu mědi při významném zmenšení hmotnosti celé soustavy. Jedná se o cívky výhybek pro středotónové i vysokotónové reproduktory.

U výhybky prvního řádu určené pro středotónový reproduktor, jejíž horní mezní kmitočet je f_d (na dolním mezním kmitočtu f_{d2} v daném případě nezáleží) (obr. 8.5), musí mít vinutí cívky s feritovým jádrem o průřezu S_j počet závitů n daný výrazem

$$n \geq 2,25 \frac{U}{f_{d2} S_j B} \quad [-; \text{V, kHz, cm}^2, \text{T}] \quad (8.26)$$

a B nemá být větší než 0,28 T, což po dosazení lze přepsat na

$$n \geq 8 \frac{U}{f_{d2} S_j} \quad [-; \text{V, kHz, cm}^2] \quad (8.27)$$

U výhybky druhého řádu pro středotónový reproduktor (obr. 8.7; 8.8) je počet závitů „podélné“ cívky (v sérii s reproduktorem)

$$n \geq 0,45 \frac{U}{f_{d2} S_j B} \quad [-; \text{V, Hz, m}^2, \text{T}] \quad (8.28)$$

nebo pro $B = 0,28$ T

$$n \geq 16 \frac{U}{f_{d2} S_j} \quad [-; \text{V, kHz, cm}^2] \quad (8.29)$$

U výhybky druhého řádu určené pro potlačení signálů o nižších kmitočtech než f_d (tedy výhybky pro středotónový nebo vysokotónový reproduktor) musí mít použitá cívka, zapojená paralelně k reproduktoru, má-li být sycení v jejím jádře B , počet závitů

$$n = 0,11 \frac{U}{f_d S_j B} \quad [-; \text{V, Hz, m}^2, \text{T}] \quad (8.30)$$

nebo při ploše jádra S_j v cm² a f_d v kHz a při $B = 0,28$ T

$$n = 3,9 \frac{U}{f_d S_j} \quad [-; \text{V, kHz, cm}^2] \quad (8.31)$$

Při návrhu indukčnosti cívky pro modifikovanou výhybku druhého řádu podle článku 8.1.3 se vychází ze vztahů (8.28), a (8.29), v nichž se dosadí za dělící kmi-

točet f_d rezonanční kmitočet indukčnosti L a kondenzátor C ($f_{rez} = 1/(2\pi\sqrt{LC})$).

Cívku pro vysokotónový reproduktor lze dimenzovat podle vztahu (8.30), případně (8.31).

Při stanovení rozměrů jádra a vinutí lze doporučit tento postup:

Podle prospektu PRAMET Šumperk (tab. 8) se zvolí vhodný typ jádra o ploše S_j a vypočte se ze vztahu (8.28) popř. (8.30) minimální možný počet závitů (pro napětí $U = \sqrt{N} Z_n$, kde N je příkon soustavy a Z_n jmenovitá impedanční hodnota daného reproduktoru).

Tab. 8. Rozměry feritových hrnčkových jader podle obr. 8.18, i vhodných pro tlumivky výhybek

a	c	e	S_j [cm ²]	A [nH]
[mm]				
7,6	18	11	0,43	100 160 200
11,5	26	16	0,94	100 160 250 400
13,5	30	19	1,36	250 400 630

Pro známou indukčnost L a vypočtený počet závitů n se určí potřebná konstanta jádra A

$$A = \frac{L}{n^2} \cdot 10^6 \quad [\text{nH; mH, } -] \quad (8.32)$$

Která odpovídá příslušná vzduchová mezera. Pokud není k dispozici jádro o dané konstantě, zvolí se typ s menší konstantou a počet závitů se zvětší, aby odpovídal vztahu

$$n = 10^3 \sqrt{L/A} \quad [-; \text{mH, nH}] \quad (8.33)$$

(pak bude maximální sycení poněkud menší, což je ovšem příznivé).

Závěrem se z plochy cívky S_c [mm²] určí průměr vodiče

$$d = \sqrt{\frac{S_c}{n}} \quad [\text{mm; mm}^2, -] \quad (8.34)$$

a jeho odpor

$$R = 1,7 \cdot 10^{-2} \frac{I_z \cdot 10^{-2} n}{(\pi/4)d^2} \quad [\Omega; \text{cm, mm}^2] \quad (8.35)$$

Protože u cívek pro feritová jádra je střední délka závitu

$$l_z = 4,55a \quad [\text{mm}],$$

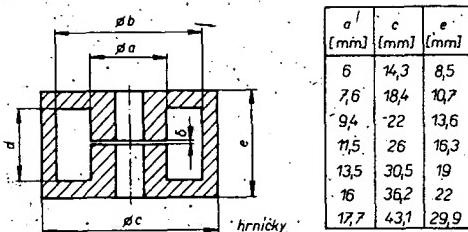
kde a je průměr středního jádra, je přibližný odpor vinutí dán vztahem

$$R = \frac{an^2}{S_c} \cdot (1,3 \text{ až } 1,5) \cdot 10^{-4} \quad [\Omega; \text{mm, mm}^2] \quad (8.36)$$

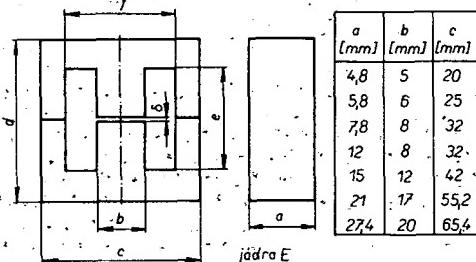
Pro úplnost je nutno mít na zřeteli, že množství mědi, potřebné k realizaci cívky o zvolené indukčnosti, je obvykle 1/50 až 1/100 množství mědi nutné ke zhotovení vzduchové cívky stejných vlastností. Cívka s jádrem má ovšem i podstatně menší objem a celkovou hmotnost.

Jako příklad uvedeme výpočet tlumivky o indukčnosti 5,1 mH pro výhybku středotónového reproduktoru o dolním mezním kmitočtu $f_d = 599$ Hz, jmenovité impedanční 8Ω a požadovaném příkonu 20 W.

Napětí na vstupu reproduktoru soustavy



Obr. 8.18. Rozměry feritových jader PRAMET vhodných pro výhybky (hrničky a jádra „E“)



$$U = \sqrt{20 \times 8} = 12,6 \text{ V.}$$

Pro realizaci, tlumivky zvolíme feritové jádro o vnějším průměru 26 mm, výšce 16 mm a hmotnosti 21 g. Z plochy jádra $S_j = 0,936 \text{ cm}^2$ si stanovíme počet závitů (vztah 8.31)

$$n = 3,9 \frac{12,6}{0,5 \cdot 0,935} = 105.$$

Jádro by mělo mít konstantu

$$A = \frac{5,1}{105^2} \cdot 10^6 = 462 \text{ nH.}$$

Protože je k dispozici jádro o konstantě $A = 450$, musíme zvětšit počet závitů na

$$n = 10^3 \sqrt{\frac{L}{A}} = 10^3 \sqrt{\frac{5,1}{450}} = 106.$$

Průměr vodiče při užitné ploše cívky $S_c = 25 \text{ mm}^2$ bude

$$d = \sqrt{\frac{25}{1,3 \cdot 106}} = 0,43 \text{ mm.}$$

Volíme vodič o $\varnothing 0,40 \text{ mm}$.

Odpor vinutí bude (při $a = 11,5 \text{ mm}$ jádra)

$$R = \frac{11,5 \cdot 106^2}{25 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4}} = 0,67 \Omega,$$

což je odpor pro daný případ přijatelný. Hmotnost mědi bude (délka závitu je 5,1 cm)

$$m = 106 \cdot 5,1 \cdot 0,04^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 8,9 = 6 \text{ g.}$$

Celková hmotnost cívky včetně jádra bude asi $21 + 6 = 27 \text{ g}$.

Hmotnost vinutí vzduchové cívky o stejně indukčnosti a činném odporu by byla, jak je možno se přesvědčit výpočtem, asi 1050 g. Hmotnost mědi by byla 175krát větší!

8.3 Překážky před reproduktory

Překážkami před reproduktory se rozumí buď ochranné mřížky umístěné před jejich ústími nebo textilní i kovové kryty. Tyto překážky musí být řešeny tak, aby škodlivé neovlivňovaly vyzařování reproduktorů.

V současné době se velmi často ponechávají ústí reproduktorů volná, což je z hlediska funkčního nejvhodnější. Volné a bez jakýchkoli překážek musí být ovšem ústí bass-reflexového otvoru až do hrsti.

musí být tlumeny natolik, aby při funkci reproduktoru nevznikly pazvuky.

Pokud je před ústím reproduktoru umístěn textil anebo jiný prodyšný materiál, je nutné, aby jeho specifický akustický odpor nepřekročil 50 Pa.s/m. Textil, pokud je volný, musí být dostatečně vzdálen od pevných částí soustavy (např. okrajů reproduktoru), aby při vyzařování akustické energie v oblasti nízkých kmitočtů na tyto části nerazel.

Je-li prodyšný materiál přitímen na perforovanou mřížku, má být jeho specifický akustický odpor menší než 50 Pa.s/m a jeho spojení s mřížkou dokonalé, aby při činnosti reproduktoru svým kmitáním nezpůsoboval pazvuky.

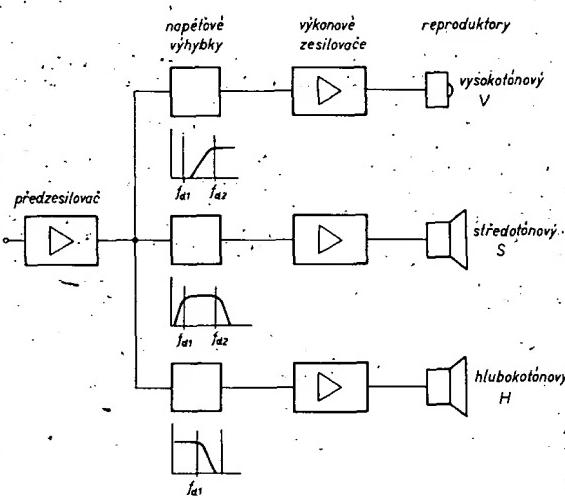
Je účelné zkontrolovat před montáží specifický akustický odpor použitého prodyšného materiálu a blízili se jeho hodnotě 50 Pa.s/m, zjistit měřením jeho vliv na výslednou kmitočtovou charakteristiku soustavy.

9. Aktivní reproduktarové soustavy

Jako aktivní reproduktarové soustavy jsou označovány jednotky, u nichž vlastní výsepásmová soustava a příslušné výkonové zesilovače včetně výhybky jsou umístěny ve společné skříně. Na vstup zesilovače se přivádí již upravený elektrický signál o vhodné úrovni z napěťového výstupu magnetofonu, přijímače (tunera) nebo jiného zdroje, případně z výstupu korekčního předzesilovače.

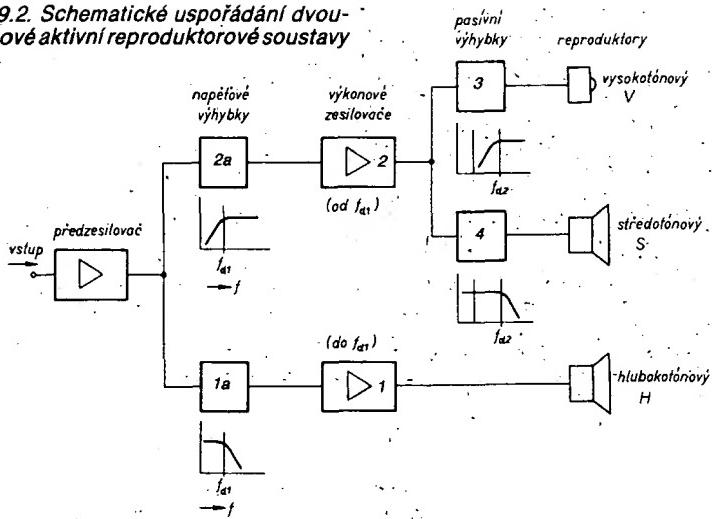
Aktivní reproduktarové soustavy bývají zpravidla třípásmové, přičemž bývají vybaveny dvěma nebo třemi výkonovými zesilovači.

Uspořádání aktivní soustavy se třemi zesilovači je na obr. 9.1. Vstupní signál je přiveden, po případném zesílení (které však není nezbytné) na napěťové výhybky, z jejichž výstupu je na vstup výkonových zesilovačů přiveden již příslušné kmitočtově omezený signál, případně upravený tak, že kmitočtový průběh akustického signálu vyzářeného dílčími reproduktory je vyrovnán. Výhybky mohou být pasivní (ovšem pouze napěťové) anebo aktivní. Lze bez obtíží použít výhybky druhého řádu nebo i řádu výšších, bez nutnosti aplikovat nákladné tlumivky. Jediným požadavkem je, aby jednotlivá pásmá na sebe náležitě navazovala. Není třeba statrat se o kmitočtový průběh vstupních impedancí reproduktorů, jako při aplikaci



Obr. 9.1. Schematické uspořádání třípásmové aktivní reproduktarové soustavy

Obr. 9.2. Schematické uspořádání dvou-pásmové aktívni reproducitorové soustavy



klasických pasivních výhybek, což je ovšem nesporná výhoda. Při volbě dělicích kmitočtů 400 a 4000 Hz bývají obvykle potřebné výkony jednotlivých zesilovačů v poměru 1 : (0,5 až 1) : 0,25.

V hlubokotónové části soustavy může být použit reproduktor ve spojení s uzavřenou anebo bass-reflexovou ozvučnicí. Výhodnější je ovšem provedení s bass-reflexovou ozvučnicí, protože v takovém případě může být díky větší citlivosti zářiče výkon hlubokotónového zesilovače menší, případně mohou být menší rozdíly výzvařovací soustavy, podstatnou měrou ovlivněny rozměry její hlubokotónové části.

Kromě aktivní soustavy se třemi oddělenými zesilovači se v některých případech uplatňuje zjednodušené provedení se dvěma výkonovými zesilovači (obr. 9.2). V tomto případě napájí první zesilovač 1, opatřený na vstupu napěťovou výhybkou 1a, omezující signál v oblasti nejnižších kmitočtů (obvykle pod 30 až 35 Hz) a signálný nad prvním dělicím kmitočtem (asi 400 až 500 Hz), hlubokotónový reproduktor (H).

Druhý zesilovač 2, napájející středotónový a vysokotónový reproduktor, je na svém vstupu opatřen obvodem 2a, uplatňujícím se jako druhá část výhybky.

Středotónový a vysokotónový reproduktor jsou napájeny z výstupu zesilovače 2 přes klasické pasivní výhybky 3 a 4, obvykle druhého řádu.

Vedle popsaných aktivních soustav existují ještě výzvařovací jednotky se dvěma nebo třemi výkonovými zesilovači, u nichž je z výstupu hlubokotónového reproduktoru zavedena zpětná vazba do vstupu příslušného výkonového zesilovače. Je to v podstatě obnova již dávno známého principu, který teprve po mnoha letech nalezl technické uplatnění. Velmi výhodného způsobu zavedení zpětné vazby využívá u svých exkluzivních výzvařovacích jednotek firma Philips: Zpětnovazební napětí je tvoreno výstupním napětím

akceleračního snímače, namontovaného na střední části membrány hlubokotónového reproduktoru (viz obr. 9.3). Protože je výstupní napětí akceleračního snímače úměrné urychlení membrány, je při konstantním vstupním napětí zesilovače udržováno také konstantní (nezávisle na kmitočtu). To platí ovšem jen do kmitočtu, do něhož urychlení kmitací čívky odpovídá co do velikosti i fáze výstupnímu napětí akceleračního snímače, tzn. jen do asi 300 až 400 Hz; to však pro daný případ postačí. Je-li urychlení membrány kmitočtově nezávislý, je také kmitočtově nezávislý akustický tlak před ní.

Přednost popsaného uspořádání spočívá v tom, že vzhledem k velkým urychlením membrány je i výstupní napětí akceleračního snímače dostatečně velké a lze je snadno dále zpracovat. Pro úplnost je vhodné mít na zřeteli, že urychlení membrány o ploše 2 dm^2 – jde například o reproduktor typu ARN 6604 – je při akustickém tlaku 1 Pa měřeném ve vzdalenosti 1 m od ústí reproduktoru (při výzvaření do poloprostoru) $a = 260 \text{ m/s}^2$ (asi 26 g), což je hodnota značná. Při vhodné koncepci akceleračního snímače (v daném případě je nejvhodnější snímač piezoelektrický s pomocnou seismickou hmotou), jehož průběh musí být kmitočtově nezávislý alespoň do čtyřnásobku horního mezního kmitočtu hlubokotónové části zářiče, může být taková rezerva výstupního signálu, že zesilovač umístěný v těsné blízkosti snímače, jaký například používá firma Philips, není nezbytný.

Problém spojený se zachováním stability systému reproduktor-snímač-zesilovač lze poměrně snadno vyřešit: Podrobná analýza celé záležitosti, která není příliš složitá, se však vymyká rámci této publikace.

Vedle popsaného zpětnovazebního systému s akceleračním snímačem existuje ještě další velmi výhodný způsob zavedení zpětné vazby z výstupního obvodu reproduktoru. Vychází se z poznátku, že

akustický tlak v blízkém poli přímovyzařujícího reproduktoru odpovídá akustickému tlaku co do velikosti i kmitočtového průběhu v poli vzdáleném. Stačí tedy, umísti-li se do těsné blízkosti membrány hlubokotónového reproduktoru tlakový mikrofon o kmitočtově nezávislém průběhu výstupního napěti (v oblasti nízkých a středních kmitočtů) a zavede-li se jeho výstupní napětí do vstupního obvodu zesilovače, napájejícího reproduktoru (obr. 9.4). Lze však s úspěchem použít i gradientní mikrofon prvního řádu s výchylkovým elektromechanickým měnícем. Pro stabilitu soustavy platí totéž jako v případě předešlého. Dolní mezní kmitočet použitého mikrofonu musí být co nejnižší (15 Hz).

Nesporná přednost tohoto uspořádání spočívá v tom, že lze použít běžný hlubokotónový reproduktor a to bez dalších nákladních úprav. Mikrofon však musí mít vyrovnaný kmitočtový průběh a musí zpracovat bez zkreslení značný akustický signál, který je v jeho blízkosti.

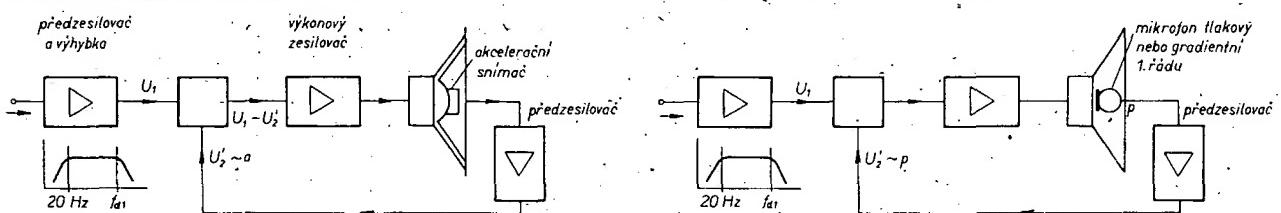
Určitou nevýhodou všech výzvařovacích jednotek s pohybem membrány řízeným zpětnou vazbou je to, že veškerý akustický výkon i v oblasti nízkých kmitočtů musí vyzářit membrána hlubokotónové jednotky. Pokud jsou požadovány větší akustické výkony v oblasti nízkých kmitočtů, je nutné, aby měl hlubokotónový reproduktor dostatečně velkou plochu membrány a velkou možnou maximální amplitudu (takzvané objemové pošinutí S_V) proto, že v daném případě nelze použít jinou ozvučnici, než uzavřenou.

Aktívni reproducitorové soustavy představují zajímavý krok ve vývoji jednotek pro výzvařování akustického signálu. Jejich hlavní nevýhodou je doposud neúnosně vysoká cena, o níž nelze předpokládat, že by se v dohledné době snížila (s ohledem na výrobní náročnost a do jisté míry i komplikovanost zařízení), i když elektretové tlakové mikrofony o velmi dobrých přenosových vlastnostech, které lze u nich aplikovat, jsou v současné době již velmi levné.

Nutno však konstatovat, že se jedná o uspořádání principiálně již dávno známé, viz například [4].

10. Měření reproduktorů a jednotek pro výzvařování akustického signálu

Znalost základních konstant a vlastností reproduktorů je nezbytně nutná pro jejich správnou aplikaci v ozvučnicích a reproduktoričeských soustavách. To se týká zejména hlubokotónových reproduktorů, u nichž výrobci (až na některé výjimky) uvádějí ve firemní literatuře jen nejzákladnější údaje, které však k návrhu nastačí. Proto je třeba tyto kusé informace doplnit vlastními měřeními. V rámci



Obr. 9.3. Hlubokotónová část aktivní reproduktoričeské soustavy se zpětnou vazbou zavedenou z akceleračního snímače spojeného s membránou hlubokotónového reproduktoru

Obr. 9.4. Hlubokotónová část aktivní reproduktoričeské soustavy se zpětnou vazbou zavedenou z mikrofonu umístěného v blízkém poli reproduktoru

této práce budou popsány měřicí metody, které lze aplikovat s minimálnimi prostředky. Bohužel ne vždy má i tyto prostředky běžný zájemce o obor elektroakustiky k dispozici.

10.1 Měření vlastností hlubokotónových reproduktorů

Pro aplikaci hlubokotónových reproduktorů jsou rozhodující údaje v kapitole 5.1. Jedná se v podstatě o 8 základních údajů, z nichž lze v podstatě odvodit všechny ostatní. Ve stručnosti je zde zopakujeme:

- N [VA] jmenovitý příkon, případně špičkový krátkodobý příkon (N_{max}),
- S [m^2] aktivní plocha membrány, případně její aktivní průměr D_{akt} ,
- R_v odpor vinutí kmitací cívky, případně jmenovitá impedance reproduktoru,
- m_{ak} akustická (anebo mechanická) m_m hmotnost kmitacího systému,
- B_1 , případně B/S , konstanta, udávající převod mezi elektrickou a mechanickou, případně akustickou stranou měniče,
- y_{max} maximální přípustná amplituda membrány v [mm], případně [m], rezonanční kmitočet kmitacího systému reproduktoru,
- Z_{rez} impedance reproduktoru při rezonančním kmitočtu.

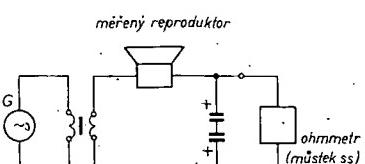
Ostatní veličiny, jako ekvivalentní objem V_{ekv} , citlivost η v kmitočtové oblasti, kdy membrána kmitá pistově, a elektrický číselník kvality Q_{el} lze ze základních veličin odvodit.

Do určité míry je zajímavá i citlivost reproduktoru v kmitočtové oblasti 250 až 4000 Hz (podle ČSN), která bývá obvykle poněkud větší než citlivost v oblasti nízkých kmitočtů a to proto, že zahrnuje vliv parciálních kmitů membrány v oblasti vyšších kmitočtů. To se týká středotonových reproduktorů nebo hlubokotónových reproduktorů pro dvoupásmové soustavy.

V běžných prospektech se uvádí jmenovitý příkon N , případně příkon krátkodobý, jmenovitá impedance Z_{jm} a případně i citlivost. Jak vyplývá z toho, co již bylo uvedeno, tyto údaje pro odpovědnou aplikaci reproduktoru naprostě nestačí. Proto je nezbytné další potřebné údaje zejména hlubokotónových reproduktorů určit měřením.

Odpor vinutí R_v kmitací cívky se určí nejsnáze běžným odporovým můstkom; pokud nás zajímá odpor kmitací cívky nezatíženého reproduktoru.

Zajímá-li nás odpor kmitací cívky zatíženého reproduktoru, z něhož lze určit oteplení cívky, je účelné jednoduché uspořádání podle obr. 10.1, při němž je



Obr. 10.1. Měření cinného odporu kmitací cívky při zatížení

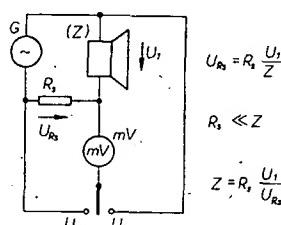
měřený reproduktor napájen ze zdroje signálů přes transformátor o malém odporu sekundárního vinutí a pomocný bipolární kondenzátor C o kapacitě volené

tak, aby jeho impedance byla malá proti jmenovité impedance reproduktoru. Pro běžné účely postačí sériová kombinace dvou elektrolytických kondenzátorů o kapacitě asi 5000 μF . Ze zvětšení odporu reproduktoru $\Delta R = R_t - R_v$ lze stanovit oteplení vinutí

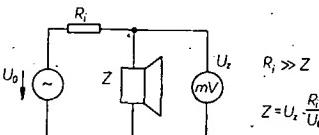
$$\Delta t = 256 \frac{\Delta R}{R_v} \quad [\text{°C}; \Omega] \quad (10.1)$$

kde R_v je odpor kmitací cívky při běžné teplotě a R_t odpor při provozu reproduktoru. Při měření je nezbytné, aby odpor sekundárního vinutí transformátoru byl zanedbatelně malý ve srovnání s odporem kmitací cívky. Oteplení Δt u běžných reproduktorů nemá být při trvalém zatížení větší než 80 až 120 °C (podle použité izolace).

Rada dalších měření vychází z elektrické impedance kmitací cívky reproduktoru. Tuto impedance lze stanovit buď vhodným měřicím impedance, na němž lze určit i její fázový úhel (například Grützmacherovým můstkem anebo jiným vhodným uspořádáním, viz např. [7] str. 81), nebo jednoduchým improvizovaným měřicem podle obr. 10.2, popř. 10.3.



Obr. 10.2. Měření elektrické impedance reproduktoru



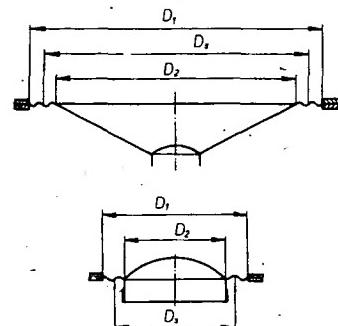
Obr. 10.3. Informativní měření elektrické impedance reproduktoru (vhodné zejména pro měření v nadrezonanční oblasti)

U prvního uspořádání, které dává přesnější výsledky již také proto, že napětí na reproduktoru U_1 je prakticky konstantní, lze měřit impedance při větším vybuzení reproduktoru. Impedanci je však nutné pro každý měřicí bod vypočítat. U uspořádání podle obr. 10.3 lze zvolit napětí generátoru U tak, aby napětí U_2 v mV odpovídalo měřené impedance. V tomto případě musí být měřicí proud v obvodu 1 mA a tedy $R_i = 1000/U_0$. Maximální měřená impedance nemá být větší než $R_i/100$. Nevýhodou této metody je, že napětí na měřeném objektu je proměnné, což může za určitých okolností ovlivnit spolehlivost měření (zejména při měřeních, při nichž se vychází z rezonančního kmitočtu reproduktoru, který bývá značně závislý na měřicím napětí).

Aktivní plochu membrány stanovíme z aktivního průměru membrány, který je přibližně roven střední hodnotě vnějšího průměru okraje vlnky membrány a vnitřního průměru této vlnky, přibližně rovného vnějšímu průměru membrány (obr. 10.4). Pak

$$D_{akt} = (D_1 + D_2)/2 \quad (10.2)$$

a aktivní plocha membrány



Obr. 10.4. Stanovení přibližného aktivního průměru reproduktoru

$$S_{akt} = \frac{\pi}{4} D_{akt}^2 \quad (10.3)$$

Rezonanční kmitočet reproduktoru f_r lze určit u samotného reproduktoru bez ozvučnice, u reproduktoru umístěného v otvoru dostatečně velké deskové ozvučnice, případně u reproduktoru vestavěného v uzavřené ozvučnici. Při tomto měření je nutno mít na zřeteli, že rezonanční kmitočet obvykle značně závisí na svorkovém napětí měřeného objektu. Při malém napětí (do 1/1000 jmenovitého napětí) je rezonanční kmitočet málo závislý na napětí, při napětí odpovídajícímu asi 1/10 až 5/10 jmenovitého napětí se rezonanční kmitočet snižuje a při dalším zvětšování napětí se začíná opět zvyšovat. Rozdíly mezi naměřenými údaji mohou být podle typu reproduktoru v rozmezí až 10% (více). Je to způsobeno proměnnou podajností uložení kmitacího systému.

Při zjišťování rezonančního kmitočtu reproduktoru se vychází z poznatku, že elektrická impedance reproduktoru je při rezonančním kmitočtu maximální. V uspořádání nejlépe podle obr. 10.2 se určí kmitočet, při němž je napětí na pomocném odporu minimální; tento kmitočet odpovídá hledanému rezonančnímu kmitočtu f_{rez} .

Je účelné stanovit rezonanční kmitočet pro velmi malé napětí U na svorkách reproduktoru, z něhož lze vycházet při stanovení hmotnosti kmitajícího systému (řádově $U = 10^{-2}\sqrt{N_r Z_r}$) a pro napětí odpovídající asi 1/2 jmenovitého napětí (při čtvrtině jmenovitého příkonu). Tato hodnota, pokud je stanovena u reproduktoru upewněného v otvoru deskové ozvučnice, má význam pro jeho aplikaci v uzavřené ozvučnici.

Hmotnost kmitacího systému reproduktoru se určí z rezonančního kmitočtu reproduktoru f_r a rezonančního kmitočtu f_{rez} , kdy je membrána zatížena pomocnou hmotností m_p . Při měření lze postupovat tak, že se položí měřený reproduktor na magnet membránou vzhůru (bez ozvučnice) a změří se rezonanční kmitočet f_r , při velmi malém svorkovém napětí (asi 1/100 napětí jmenovitého). Pak se položí na membránu závaží o hmotností m_p , která je 2 až 5krát větší než předpokládaná hmotnost kmitacího systému a změří se znova rezonanční kmitočet f_{rez} . Závaží musí přitom klidně spočívat na membráně a musí s ní spoluškmitat (bez značného poskování) jako celek.

$$m_{m1} = \frac{m_p}{(f_r/f_{rez})^2 - 1} \quad (10.4)$$

a jeho akustická hmotnost

$$m_{ak,1} = m_m \frac{1}{S^2} \quad (10.5)$$

Při umístění reproduktoru v ozvučnici bude hmotnost kmitacího systému zvětšena přibližně o hmotnost spolkumitajícího vzduchu, tedy o

$$m_{vzd} = \rho \cdot 0,43 \cdot \pi R^3 = 0,2D^3 [\text{kg; m}] \quad (10.5)$$

což je hodnota mechanická, anebo

$$m_{vzd,ak} = 0,33/D [\text{kg/m}^4; \text{m}] \quad (10.5a)$$

pokud nás zajímá hodnota akustická.

Pak je celková hmotnost kmitajícího systému membrány včetně spolkumitajícího vzduchu

$$m_{ak,c} = m_{ak,1} + m_{vzd,ak} \quad (10.6)$$

s níž je nutno počítat u reproduktoru vestavěného do skříňové ozvučnice. Rezonanční kmitočet reproduktoru, z něhož nutno vycházet při návrhu ozvučnice, je dán vztahem:

$$f_r = \frac{f_r}{\sqrt{1 + \frac{m_{vzd,ak}}{m_{1,ak}}}} \quad (10.7)$$

Ekvivalentní objem ozvučnice V_{ekv} lze vypočítat z hmotnosti kmitacího systému m_m , případně $m_{ak,1}$ a z rezonančního kmitočtu f_r ze vztahu:

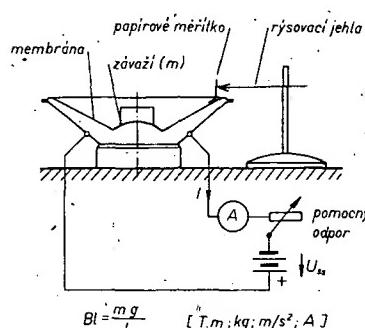
$$V_{ekv} = \frac{\rho \cdot \Omega}{(2\pi f_r)^2 m_{ak,1}} = \frac{3,55 \cdot 10^3}{f_r^2 m_{ak,1}} \quad [m^3; \text{Hz}, \text{kg/m}^4] \quad (10.8)$$

$$V_{ekv} = \frac{3,55 \cdot 10^6}{f_r^2 m_{ak,1}} \quad [l; \text{Hz}, \text{kg/m}^4] \quad (10.8a)$$

Konstantu Bl , případně Bl/S lze stanovit několika způsoby. Nejjednodušší je způsob statický, při němž se membrána reproduktoru položeného na stole osou vzhůru zatíží závažím o hmotnosti m ; přičemž se známým stejnosemerným proudem i , zavedeným do kmitací cívky, průhyb membrány způsobený závažím vyrovnan. Pak lze Bl vypočítat z výrazu

$$Bl = \frac{mg}{i} \quad [\text{T.m; kg, m/s}^2, \text{A}] \quad (10.9)$$

kde g je těžové zrychlení ($\approx 10 \text{ m/s}^2$). Výchylku membrány čteme na měřítku, přilepeném na membráně reproduktoru (viz obr. 10.5).



Obr. 10.5. Statické měření konstanty Bl reproduktoru

Hodnotu Bl lze dále určit z měření elektrické impedance reproduktoru, uloženého na stole podle obr. 10.5. Postup je tento:

Při dostatečně malém měřicím napětí (jako při zjišťování hmotnosti kmitacího systému) se určí rezonanční kmitočet f_{rez} a impedance reproduktoru při tomto kmitočtu (Z_{rez}). Přitom je nutno znát činný odpor vinutí kmitací cívky R_v . V dalším se zatíží membrána závažím o hmotnosti m_p (ohmotnosti rovné asi polovině hmotnosti kmitacího systému, na skutečné velikosti příliš nezáleží), načež se znova změří vstupní impedance Z_m reproduktoru za toto stavu. Použité závaží přednostně ve tvaru prstence, případně zhotoveného z plastického materiálu, například z plastelin a colorplastu, musí při měření klidně spočívat na membráně reproduktoru.

Hledanou hodnotu Bl pak vypočteme ze vztahu:

$$Bl = \sqrt{2\pi f_r m_p (Z_{rez} - R_v)} \cdot \sqrt{\frac{Z_m^2 - R_v^2}{Z_{rez}^2 - Z_m^2}} \quad [T.m; \text{Hz}, \text{kg}, \Omega] \quad (10.10)$$

Hodnotu Bl/S stanovíme vydělením určené velikosti Bl aktivní plochou membrány.

Cinitle Jakosti reproduktoru můžeme stanovit s dostatečným přiblížením rovněž z měření absolutních hodnot impedance reproduktoru a to jak pro reproduktor bez ozvučnice, tak pro reproduktor na pomocné deskové ozvučnici, anebo i reproduktor vestavěný v uzavřené ozvučnici.

Stanoví se již popsanými způsoby činný odpor kmitající cívky a impedance Z_{rez} při rezonančním kmitočtu f_{rez} . Pro geometrickou střední hodnotu Z_{rez} a R_v

$$Z_{stř} = \sqrt{Z_{rez} R_v} \quad (10.11)$$

se určí kmitočty f_a a f_b , při nichž má reproduktor tuto střední velikost impedance. V dalším si stanovíme

$$A = \sqrt{Z_{rez}/R_v} \quad (10.12)$$

$$A' = A - \frac{1}{A} \quad (10.13)$$

$$F = \frac{\sqrt{f_b}}{f_b - f_a} \quad (10.14)$$

z nichž lze určit všechny tři potřebné činitely jakosti reproduktoru (obr. 10.6a)

$$Q_0 = AF \quad (\text{mechanický činitel jakosti}),$$

$$\text{činitel naprázdno}) \quad (10.15),$$

$$Q_{el} = F/A \quad (\text{elektrický činitel jakosti}) \quad (10.16),$$

$$Q_c = F/A \quad (\text{celkový činitel jakosti}) \quad (10.17),$$

všechny vztázené na rezonanční kmitočet reproduktoru.

Pomocná metoda dává vyhovující výsledek, pokud kmitočet f_b není vyšší než kmitočet, při němž elektrická impedance reproduktoru není ještě příliš ovlivněna reaktancí kmitající cívky.

Jiná metoda stanovení činitelů jakosti reproduktoru použitelná v případě, že f_b je příliš vzdálen od f_{rez} , je patrná z obr. 10.6b. I tato metoda vychází z kmitočtového průběhu vstupní impedance reproduktoru, ale f_{a1} a f_{b1} jsou kmitočty, při nichž se zmenší vstupní impedance na

$$Z = \frac{1}{\sqrt{2}} Z_{rez} \sqrt{1 + \left(\frac{R_v}{Z_{rez}}\right)^2} \quad (10.18)$$

Cinitle Jakosti reproduktoru pak jsou:

$$Q_0 = \frac{f_r}{f_{b1} - f_{a1}} \quad (10.19)$$

$$Q_{el} = Q_0 \frac{R_v}{Z_{rez} - R_v} \quad (10.20)$$

$$Q_c = Q_0 \frac{R_v}{Z_{rez}} \quad (10.21)$$

Jinak lze ovšem při známém Bl stanovit činitely jakosti reproduktoru výpočtem:

$$Q_0 = \frac{2\pi f_r m_m}{(Bl)^2} (Z_{rez} - R_v) \quad (10.22)$$

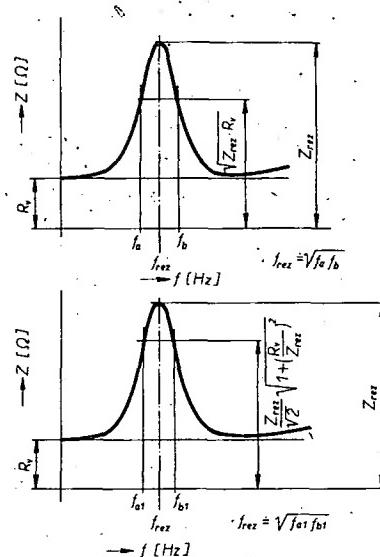
$$Q_{el} = \frac{2\pi f_r m_m}{(Bl)^2} R_v \quad (10.23)$$

$$Q_c = Q_{el} \frac{Z_{rez} - R_v}{Z_{rez}} = \frac{Q_0 Q_0}{Q_{el} + Q_0} \quad (10.24)$$

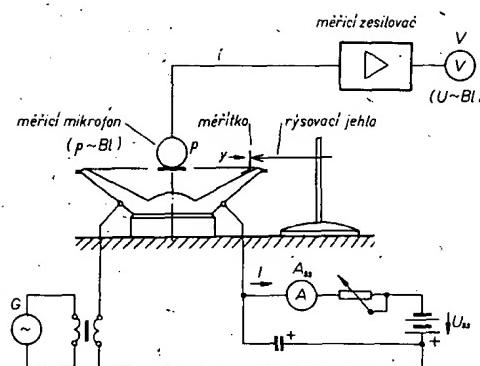
Z jakostí Q , stanovených pro reproduktor bez ozvučnice, lze s dostatečným přiblížením určit příslušné činitely jakosti, platící pro tentýž reproduktor, vestavěný ve skříňové ozvučnici. Původně určené hodnoty je třeba pouze vynásobit činitelem $\sqrt{1 + \frac{m_{vzd,ak}}{m_{1,ak}}}$, přičemž $m_{vzd,ak}$ je dán výrazem (10.5a).

Z doposud naměřených údajů na reproduktoru bez ozvučnice lze s dostatečným přiblížením určit jeho citlivost v nadrezonanční oblasti (za předpokladu písťového kmitání membrány) ze vztahu

$$\eta_{dB} = 52,1 + 10 \log \frac{f_{rez}^3 V_{ekv}}{Q_{el}} + 20 \log \left(1 + \frac{m_{vzd,ak}}{m_{1,ak}} \right) \quad (10.25)$$



Obr. 10.6. Určení činitelů kvality přímoveryzajíždícího dynamického reproduktoru z kmitočtového průběhu jeho vstupní impedance



Obr. 10.7. Uspořádání pro zjištění závislosti Bl na amplitudě membrány hlubokotónového reproduktoru ($Bl = f(y)$)

na měřítku, přilepeném na jejím okraji. Při měření se postupuje takto: nastavíme hladinu budicího signálu o kmitočtu asi 3 až $5f_{rez}$ tak, aby na vhodném rozsahu voltmetu na výstupu měřicího mikrofonu byla výchylka nejlepší na délku 10, což reprezentuje referenční hodnotu $Bl = 100\%$. Do obvodu reproduktoru zavedeme takový stejnosměrný proud, aby se membrána vychýlila vzhůru, v kladném směru, o zvolenou výchylku y (například o 1 mm). Potřebný stejnosměrný proud I na napětí na výstupu mikrofonu, které je úměrné Bl , se změří a vynesou do grafu (obr. 10.8). Tak se postupuje dále pro pozitivní i negativní výchylku membrány (pro změnu polarity výchylky stačí pouze

Ve všech případech je ovšem nezbytný měřicí mikrofon, který lze vyhovujícím způsobem pro přibližná měření nahradit elektretovým mikrofonem spojeným s integrovaným předzesilovačem, který se používá u některých kazetových magnetofonů. Tyto mikrofony o vnějším průměru asi 12 mm mají velmi využitelný kmitočtový průběh od nejnižších kmitočtů až do 8 až 10 kHz.

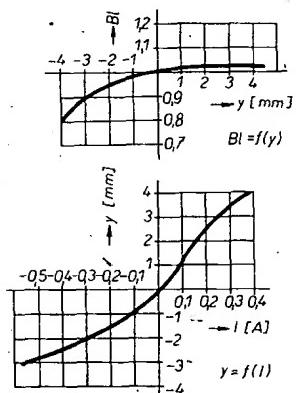
a) Měření přenosových vlastností reproduktoru v blízkém poli

Měření lze uskutečnit jak u reproduktoru bez ozvučnice, tak s deskovou ozvučnicí. Tlakový měřicí mikrofon se umístí do středu membrány, ve vzdálenosti 20 až 30 mm od jejího vrcholu. Napětí na svorkách reproduktoru se volí tak, aby hladina akustického tlaku v místě mikrofonu nepřekročila velikost, kterou je mikrofon schopen zpracovat (u elektretového mikrofonu s předzesilovačem nemá výstupní napětí překročit 50 mV).

Kmitočtový průběh lze měřit buď bod po bodu, nebo registraci výstupní úrovni, a to od nejnižších kmitočtů až do kmitočtu

$$f = \frac{C_0}{2\pi D} [\text{Hz}; \text{m/s}, \text{m}] = \frac{55}{D} [\text{Hz}; \text{m}]$$

Základní uspořádání je na obr. 10.9.

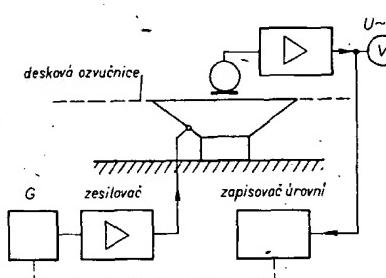


Obr. 10.8. Závislost $Bl = f(y)$ nesprávně sestaveného hlubokotónového reproduktoru (kmitaci systém je trvale vychýlen dovnitř reproduktoru)

přepolovat svorky reproduktoru). Z grafů se pak zjistí možná výchylka membrány, při níž se nesmí enormně zmenšit Bl , ani omezit amplitudu vlivem nonlinearity uložení. Obvykle limituje využitelnou výchylku zmenšení Bl , zejména tehdy, je-li kmitací systém vlivem nesprávné montáže vysunut ze své optimální polohy (což se projeví nesymetrií křivky na obr. 10.8).

Kmitočtový průběh reproduktoru možno stanovit jednoduchými prostředky, bez použití obvykle těžko dostupné bezdovukové komory třemi způsoby a to:

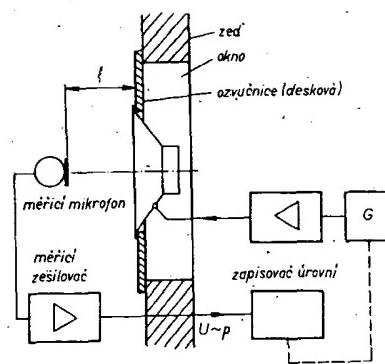
- měřením v blízkém akustickém poli reproduktoru,
- měřením ve volném poli, venku,
- měřením v uzavřené místnosti ve vzdálenosti mikrofonu od ústí reproduktoru značně menší, než je dozvuková vzdálenost místnosti.



Obr. 10.9 Uspořádání pro měření kmitočtového průběhu reproduktoru v blízkém akustickém poli (měření bez ozvučnice nebo s deskovou ozvučnicí)

Z naměřeného kmitočtového průběhu lze mimo jiné stanovit přímo i celkový činitel jakosti Q_c reproduktoru, který je podílem akustického tlaku při rezonančním kmitočtu reproduktoru (odpovídajícímu příslušnému výstupnímu napětí mikrofonu U_{rez}), k výstupnímu napětí U v oblasti nadrezonanční, v níž je kmitočtový průběh kmitočtově nezávislý). Pro celkový činitel jakosti pak platí

$$Q_c = \frac{U_{rez}}{U} \quad (10.26)$$



Obr. 10.10. Měření kmitočtového průběhu reproduktoru při vyzářování do poloprostoru

Popsané měření lze s dostatečnou spolehlivostí uskutečnit v běžné, akusticky neupravené místnosti, a to jak u reproduktoru bez ozvučnice, tak u reproduktoru vestavěného ve standardní ozvučnici, nebo konečně u reproduktoru vestavěného v uzavřené ozvučnici.

b) Měření reproduktoru ve volném akustickém poli

Reproduktor je podle obr. 10.10 umístěn v otvoru deskové ozvučnice, zakrývající okno měřicí místnosti. Desková ozvučnice má pokud možno lícovat s vnější stěnou budovy, s níž tvoří rozlehlu rovinou ozvučnici.

Měřicí mikrofon je umístěn v ose reproduktoru, nebo ve směru odchýleném od této osy, ve vzdálenosti ξ (asi 1 m) od ústí reproduktoru. Reproduktor má být na ozvučnici montován zepředu.

Důležité je, aby ve směru prodloužené osy reproduktoru nebyla rozlehlá překážka, od níž by se odražel zpět vyzářený akustický signál.

Při popsaném uspořádání lze zjistit kromě kmitočtového průběhu také směrové charakteristiky reproduktoru, nelineární zkrácení i citlivost reproduktoru (viz ČSN 368265, článek 83), když se stanoví střední hladina p_s [dB] akustického tlaku v kmitočtovém pásmu 250 až 4000 Hz ve vzdálenosti $\xi = 1$ m, při svorkovém napětí reproduktoru

$$U = \sqrt{1 + Z_n} \quad (10.27)$$

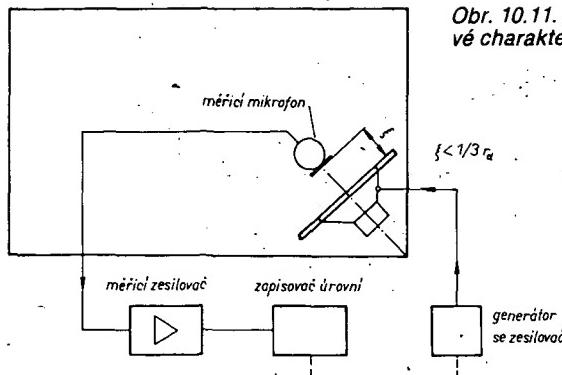
kde Z_n je jeho jmenovitá impedance.

Stejným způsobem lze zjistit kmitočtový průběh jakékoli reproduktorové soustavy. Popsaná metoda je zcela exaktní.

c) Měření reproduktoru v uzavřené místnosti

Pokud není možné improvizovat měření podle b), lze získat alespoň informativní údaje o daném reproduktoru měřením v uzavřené místnosti, která má být dostatečně akusticky tlumená alespoň běžným nábytkem a má mít objem větší než 60 m^3 .

Reproduktor se připevní na deskovou ozvučnici o rozměrech alespoň $1,2 \times 1,2 \text{ m}$ (opět zepředu) a to mírně excentricky (tj. umístí se blíže k rohu místnosti, aby osa reproduktoru směřovala přibližně do protějšího rohu, obr. 10.11). V ose reproduktoru je situován opět měřicí mikrofon, jehož vzdálenost od ústí reproduktoru má být nejvýše 1/3 dozvukové vzdálenosti místnosti, dané vztahem



Obr. 10.11. Informativní zjištění kmitočtové charakteristiky reproduktoru v uzavřené místnosti

10.3.2 Stanovení kmitočtového průběhu soustavy, jejích směrových vlastností a citlivosti

Reprezentativní výsledky uvedených měření lze získat nejsnáze při uspořádání podle obr. 10.10, kdy se reproduktoru soustava umístí do okna a nechá vyzařovat do poloprostoru.

Jiné možné a přitom velmi výhodné uspořádání zářiče a měřicího mikrofonu je na obr. 10.12, kdy je vyzařovací soustava umístěna v zemi tak, aby její čelní plocha lícovala s povrchem země. Analogicky lze měřit na ploché střeše. Měřicí mikrofon je přitom umístěn opět v ose soustavy, která je určena referenčním bodem na její přední stěně. Tento referenční bod, který udává výrobcе, bývá obvykle v blízkosti vysokotónového zářiče. Vzdálenost měřicího mikrofonu od referenčního bodu, která je předepsaná ČSN, se volí obvykle 3 až 4krát větší, než je čelní rozměr soustavy (případně vzdálenost jeho zářičů).

Směrové vlastnosti soustavy velmi dobře charakterizuje soustava kmitočtových průběhů, získaných pro různé odchylky spojnice měřicího mikrofonu s referenčním bodem soustavy od její hlavní osy, obvykle kolmé k čelní desce soustavy.

Zajímavé jsou průběhy pro různé směry uvažované v horizontální rovině soustavy (kdy bývá obvykle úhel k vyzařování širší) a v rovině vertikální, kdy při svalem uspořádání zářičů bývá vyzařovací úhel menší. Taková soustava kmitočtových průběhů je pro názornost na obr. 10.13.

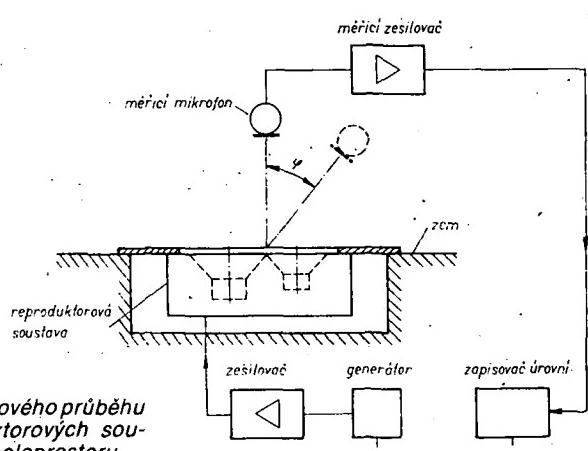
Z kmitočtového průběhu při znalosti středního hladiny akustického tlaku p_s v rozmezí 250 až 4000 Hz, měřené v vzdálenosti ξ , a napětí U na svorkách soustavy o jmenovité impedance Z_0 lze stanovit její citlivost buď v lineárním měřítku (Pa/1 VA/1 m) nebo v dB.

$$\eta = (p_s / \sqrt{N}) (\xi / 1) \quad [\text{Pa; VA, m}]$$

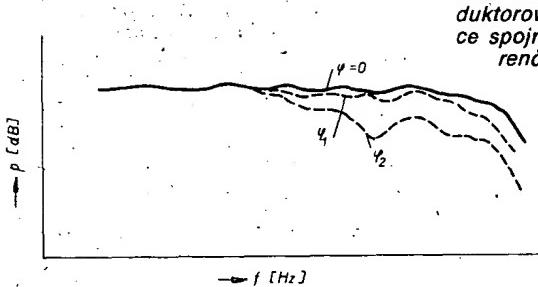
$$\eta_{\text{dB}} = 94 + 20 \log p_s \xi \quad [\text{dB}, \sqrt{\text{VA/m}}].$$

Není-li možnost uskutečnit popsané exaktní měření, lze pro hrubou informaci použít kombinaci měření v blízkém poli v oblasti nízkých kmitočtů a měření ve vzdálenosti menší než poloměr dozvuku místnosti, v níž se měření uskutečňuje. Tímto způsobem lze získat jen přibližný relativní kmitočtový průběh bez údaje citlivosti.

Při měření reproduktorové soustavy s uzavřenou ozvučnicí lze stanovit kmitočtový průběh v oblasti nízkých kmitočtů měřením v blízkém poli hlubokotónového reproduktoru. Jde ovšem pouze o relativní průběh, což ve většině případů postačí.



Obr. 10.12. Měření kmitočtového průběhu reproduktoru a reproduktorových soustav při vyzařování do poloprostoru



Obr. 10.13. Kmitočtové průběhy reproduktoru soustavy v závislosti na odchylce spojnice měřicího mikrofonu s referenčním bodem od osy soustavy

Další relativní průběhy se stanoví při umístění měřicího mikrofona mezi sousedními reproduktory, jejichž přenášená pásmá na sebe navazují a to ve vzdálenosti asi 10 až 20 cm od čelní stěny ozvučnice. Výsledný kmitočtový průběh je třeba sestavit ze zaznamenaných průběhů dílčích.

Pokud je pro reprodukci signálů o nízkých kmitočtech použit zářící s bass-reflexovou ozvučnicí, měřicí mikrofon při kontrole hlubokotónové části (při měření v blízkém poli) se umístí mezi okraj hlubokotónového reproduktoru a okraj výstupu bass-reflexového hrdla, do vzdálenosti asi 10 až 15 cm od čelní desky zářice.

Ostatní části kmitočtové charakteristiky se určí jako u soustavy s uzavřenou ozvučnicí a obdobně se sestaví celková kmitočtová charakteristika.

Takto stanovená kmitočtová charakteristika má ovšem jen informativní význam. Hrubé závady soustavy jsou však na ní dostatečně zřetelné patrné.

Měřením v blízkém poli lze určit i nelineární zkreslení (pokud ovšem zkreslení měřicího mikrofonu je i při vyšších hladinách zvuku dostatečně malé).

11. Závěr

Pro dosažení opravdu kvalitního poslechu musí být splněno několik základních podmínek, z nichž některé jsou všeobecně známé, jiné si přes jejich nespornou důležitost často ani neuvědomujeme.

Základním požadavkem je ovšem kvalitní snímek, který je reprodukován a to jak po stránce technické, tak i hudební. Velmi důležitý je způsob snímání signálu (rozmištění účinkujících ve studiu, umístění mikrofonů) a akustické vlastnosti studia, v němž je snímek pořizován. Dobrá-technická úroveň záznamového zařízení i mikrofonů je v současné době již samozřejmostí. To, co zde bylo právě řečeno, se týká v prvé řadě snímků tzv. vážné hudby. U snímků tzv. „pop-music“, které bývají obvykle uměle sestavovány ze záznamů jednotlivých hlasů snímaných v těsné blízkosti sólistů nebo nástrojových skupin, je situace ovšem jiná. Snímek je pořizován více či méně synteticky a tak se vliv akustických vlastností studia prakticky neuplatní. Nejde obvykle také o snímek, u něhož by byla snažba dosáhnout přirozené a věrné reprodukce, protože v tomto případě se jedná v nejlepším případě o reprodukci určité zvukové představy hudebního režiséra snímků, popř. v mezech možnosti o reprodukci zvukového obrazu, který byl vytvořen v režijní místnosti při konečné revizi snímků, vzniklého aplikací nejrůznějších pomocných zařízení (dozvukových zařízení, korekčních zesilovačů, zařízení umožňujících různé pseudostereoefonické efekty, a často i zařízení zářemně zkreslujících signály, s vydatným využitím možnosti, které skýtá sestříh).

Další podmínkou kvalitní reprodukce je dobré reprodukční zařízení včetně reproduktoru soustav, což je obecně známé. Méně známý je význam správného umístění reproduktoru soustav v poslechové místnosti, význam jejich akustických vlastností a konečně i nesporná úloha hladiny zvuku a její spojitost s konečným vjemem. Hladina hlasitosti signálu při poslechu má odpovídat druhu a charakteru reprodukovaného díla. Přitom ovšem nutné brát také ohled na to, aby akustickým signálem pronikajícím do okolí, zejména sousedních bytů, nebylo degradováno životní prostředí hlukem, kterým tento pro posluchače žádoucí zvuk pro nezúčastněného vlastně je. A může to být mnohdy hluk značně nepřijemnější, než jakýkoli průmyslový hluk, který nenese žádnou zářernou informaci.

Je známo, že obytné domy ze současné bytové zástavy jsou řešeny tak, že akustický signál o hladině 75 dB v místnosti v sousedním bytě anebo jiném přilehlém prostoru nemá být rušivý (pokud byla stavba provedena s dostatečnou péčí, je průzvučnost stěn okolo 50 dB).

Je-li tento hladina zvuku při reprodukci krátkodobě a pouze ve špičkách 90 dB, bude v sousedních bytech hluk o hladině 40 až 42 dB, což je mimo dobu nočního klidu ještě na krajní mezi přijatelností (nesmí se ovšem jednat o hladinu trvalou!).

V budovách, kde není nebezpečí rušení sousedů hlukem (jde o samostatné domky), lze zvýšit hladinu v místě poslechu až na 94 až 96 dB (ovšem opět jen krátkodobě). S ohledem na zdraví posluchače nelze doporučit dlouhodobý poslech touto úrovni signálu. Nutno konstatovat, že ne vždy se tato zásada zachovává a to obvykle při poslechu „pop-music“, kdy bohužel maximální hladina signálu má téměř trvalý charakter.

Trvá-li posluchač ke své škodě na vysokých hladinách signálu bez ohledu na vlastní zdraví, lze mu doporučit sluchátkový poslech, kdy lze bez obtěžování okolí hlukem dosáhnout hladinu zvuku až do 120 dB s elektrickým příkonem okolo 1 VA. V každém případě nutno mít na zřeteli nespornou škodlivost vysokých hladin zvuku, jak na sluch, tak i na celý nervový systém.

Obytná místnost, v níž se má uskutečnit kvalitní poslech reproduktoru soustavami, má mít objem větší než 40 m³ a dobu dozvuku okolo 0,5 s, takže její dozvuková vzdálenost r_d je asi 0,5 m. Místnost má být vybavena nábytkem tak, aby jím byly její stěny co nejvíce zakryty a tak byl akustický signál v dostatečné vzdálenosti od zářic dostatečně difúzní. Členitost místnosti ovlivněná nábytkem má příznivý vliv na difuzitu výsledného akustického pole v ní. Je to obdobné jako u starých, po akustické stránce kvalitních koncertních sálů a divadel, u nichž členitost jejich povrchu (lóže, sloupy, sochy

apod.) velkou měrou přispívá k jejím dobrým akustickým vlastnostem.

Jak již bylo řečeno, jsou vyzářovací soustavy určené pro reprodukci zvuku řešeny tak, aby měly optimální přenosové vlastnosti při vyzářování do poloprostoru. Pak je s ohledem na činitel směrovosti vzdálenost od jejich ústí, kdy je stejná hladina přímého signálu a signálu difúzního, rovná $\sqrt{Q_s} = 0,7$ m. Při citlivosti η_{dB} reproduktoru soustavy je hladina difúzního signálu (při činiteli směrovosti Q_s a příkonu soustavy N [VA])

$$p_{dif,dB} = \eta_{dB} - 20\log r_d - 10\log Q_s + 10\log N \quad (11.1)$$

tedy u běžné obytné místnosti a vyzářování do poloprostoru (v oblasti nízkých a středních kmitočtů)

$$p_{dif,dB} = \eta_{dB} + 10\log N + 1,5 \quad [dB; VA] \quad (11.1a)$$

Pro dosažení hladiny $p_{dif,dB}$ je za stejných podmínek nutný příkon

$$N = 10^{\frac{1}{10}(\eta_{dB} - \eta_{dB} + 20\log r_d + 10\log Q_s)} \quad (11.2)$$

čili u běžné místnosti o $r_d = 0,5$ m

$$N = 10^{\frac{1}{10}(\eta_{dB} - \eta_{dB} - 1,5)} VA \quad (11.2a)$$

Při současné činnosti obou soustav je ovšem příkon pro napájení každé z nich poloviční.

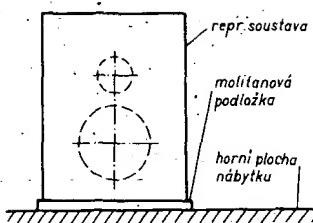
Z uvedeného je patrné, že potřebné příkony jsou značně menší než výstupní výkony běžných stereofonních zesilovačů, které jsou z tohoto hlediska značně předmenzované.

Jako příklad uvažujme reproduktoru soustavu o citlivosti 86 dB/VVA/m (což je hodnota dosti nízká). Pro dosažení úrovně signálu v místnosti (rozumí se v difúzním akustickém poli) 94 dB je potřebný celkový příkon

$$N = 10^{\frac{1}{10}(94 - 86 - 1,5)} = 4,5 VA,$$

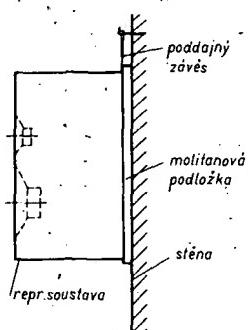
tedy 2,25 VA pro kanál. (Při využití plného výkonu stereofonního zesilovače 2 × 20 VA byla hladina akustického tlaku v místnosti 103,5 dB, což je ovšem hladina neúnosně vysoká.) Hladina 94 dB je dosažena v libovolném místě místnosti, ve vzdálenosti větší než $r_d \sqrt{Q_s} = \sqrt{2} r_d$ (0,7 m) od ústí soustav, pokud se neprojeví vliv stojatých vln v prostoru. Stojaté akustické vlny vznikající při vybuzení uzavřeného prostoru sinusovým signálem mohou střední hladinu hlasitosti v určitých místech prostoru značně zvýšit.

Aby reproduktoru soustavy vyzářovaly žádoucím způsobem do poloprostoru, je nutno je umístit tak, aby svou zadní stěnu přilehaly ke stěně místnosti. V krajním případě je lze na stěnu místnosti přímo zavést. Nutno však omezit na nejzářímez případě výkonem vibraci reproduktoru soustavy na zdi, případně podlahu poslechové místnosti, kterými se pak mohou šířit po konstrukci budovy a způsobovat v okolních bytech nežádoucí hluk. Je účelné, aby vyzářovací jednotky byly odděleny od okolí poddajnými podložkami. Tak, spočívá-li soustava svým dnem na nábytku anebo podlaze, je účelné, je-li opatřena velmi poddajnými nožičkami, nebo postavena na podložku z poddajného materiálu, například měkkého pěnového molitanu (obr. 11.1). Je-li soustava



Obr. 11.1. Poddajné uložení reproduktoru v soustavě na vodorovnou plochu nábytku

zavřena na stěnu, je nutno mezi její zadní stěnu a zeď umístit podobnou vrstvu poddajného materiálu, přičemž vlastní závěs má být rovněž poddajný (například pryžový) (obr. 11.2). Podložka mezi pevným



Obr. 11.2. Zavření reproduktoru v soustavě na zed'

ným tělesem a soustavou nemusí být ovšem kompaktní – postačí jen několik distančních podložek menších rozměrů.

Poddajné podložky omezí jednak přenos vibrací na stěny, případně podlahu místnosti, jednak zmenší možnost vzniku mechanické vazby mezi reproduktoru vými soustavami a ostatním zařízením, zejména gramofonem (omezí se tak nebezpečí vzniku zpětné vazby anebo zvlnění výsledné kmitočtové charakteristiky, ovlivněné touto mechanickou vazbou).

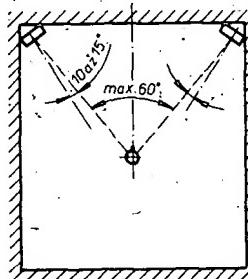
Vyzařovací jednotky je třeba umístit tak, aby se jejich vyzařovací podmínky navzájem co nejméně lišily. Vyhovující je jejich uspořádání podle obr. 11.3, kdy jsou umístěny u kratší (*a*) anebo u delší stěny (*b*) místnosti. Je-li délka delší stěny místnosti větší než 4 m, lze připustit mírně nesymetrické uspořádání soustav, ne-

však více než o 1 m od středu stěny. Vzájemná vzdálenost soustav má být v rozmezí 1,5 až 2,5 m a soustavy s posluchačem mají tvořit, jak je známo, rovnoramenný trojúhelník, v druhém případě o vrcholovém úhlu minimálně 45°. Soustavy mají být situovány tak, aby jejich referenční body byly ve výši uši posluchače a podle možnosti natočeny tak, aby úhel spojnice jejich referenčního bodu s posluchačem a referenční osou nebyl větší než 15 až 20°.

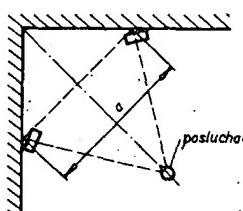
U uspořádání podle obr. 11.3 může být soustava vestavěna do police nábytku, případně nábytkové stěny.

Jiné možné uspořádání reproduktoru vývařovacích soustav v poslechové místnosti je na obr. 11.4, kde jsou záříče umístěny u na-

če, přenášejícího pouze signály o nejnižších kmitočtech (pod 80 Hz).



Obr. 11.5. Umístění vyzařovacích soustav stereofonního zařízení v rozích místnosti



Obr. 11.4. Umístění vyzařovacích soustav stereofonních zařízení u dvou na sebe kolmých stěn

vzájem na sebe kolmých stěn. Toto uspořádání má tu přednost, že se jím omezí vznik stojatých vln v místnosti na minimální možnou míru, což zlepší výslednou difuzitu pole.

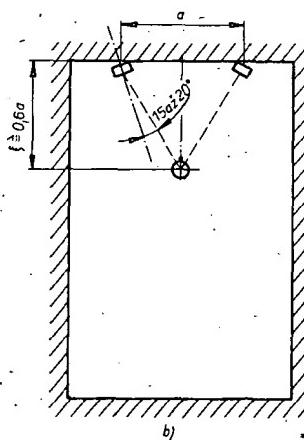
Je však výhodné i uspořádání rohové podle obr. 11.5. V tomto případě je třeba mít na zřeteli, že se proti předchozím případům zdůrazňují signály o velmi nízkých kmitočtech a to asi o 3 dB, pokud jde o hladinu difuzního signálu. Hladina přímého signálu se ovšem zvyší o 6 dB ve srovnání s uspořádáním soustav umístěných u zdi.

Tím byly ve stručnosti probrány hlavní podmínky pro dosažení optimálního polohu reprodukovovaného akustického signálu, které je vhodné respektovat.

Vzhledem k omezenému rozsahu nebylo možno uvést některé nové poznatky týkající se dalších možných zdokonalení bass-reflexových záříčů a zejména pak nových možností, jak zmenšit rozdíly vyzařovacích jednotek a zlepšit přenosové vlastnosti zařízení aplikací dalšího září-

Literatura

- [1] Merhaut a kol.: Příručka elektroakustiky. Praha: SNTL 1964.
- [2] Merhaut, J.: Teoretické základy elektroakustiky. Praha: ACADEMIA 1976.
- [3] Smetana, C. a kol.: Praktická elektroakustika. Praha: 1981.
- [4] Olson, H.: Acoustical Engineering. D. Van Nostrand Comp.: N. York, London, Toronto 1964.
- [5] Lachlan, M.: Loud Speakers. Dover Publications, Inc.: New York, 1960.
- [6] Beranek, L.: Acoustic Measurements. J. Wiley & Sons, Inc.: New York, 1950.
- [7] Boleslav, A.: Nízkofrekvenční a elektroakustická měření. Praha: SNTL 1961.
- [8] Boleslav, A.: Reproduktory a ozvučnice. Praha: SNTL 1960.
- [9] Faktor, Tischer a kol.: Magneticky měkké materiály ve sdělovací technice. Praha: SNTL 1961.
- [10] Kolmer, F.: Prostorová akustika. Praha: SNTL 1980.
- [11] Salava, T.: Elektroakustická měření. Praha: SNTL 1979.
- [12] Small, R. H.: Vented-Box Loudspeaker Systems. JAES, říjen 1973.
- [13] Small, R. H.: Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis. JAES, vol. 20, červen 1972.
- [14] Small, R. H.: Closed-Box Loudspeaker Systems. JAES, vol. 20, prosinec 1972.
- [15] Thiele, A. N.: Loudspeaker in Vented Boxes. Proc. IEEE Australia, vol. 22, květen 1961.
- [16] ČSN 36 8261: Reproduktory (1967).
- [17] ČSN 36 8262: Přímovyzařující elektrodynamicke reproducitory (1967).
- [18] ČSN 36 8265: Reproduktoru vývařovacích soustav (1971).
- [19] ČSN 36 7006: Měření akustických charakteristik přístrojů a zařízení s akustickým výstupem (1972).



Obr. 11.3. Umístění vyzařovacích soustav stereofonního zařízení v poslechové místnosti u jedné stěny

AKTIVNÍ REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA

Ing. Jiří Mrnuštík

V poslední době se hodně hovoří o tzv. aktivních reproduktorových soustavách. Jde o systém s výkonovými zesilovači vestavěnými přímo v reproduktových skříních a řízenými jednoduchým napěťovým předzesilovačem. O takovou konstrukci jsem se pokusil a položil jsem si následující podmínky:

- maximální jednoduchost,
- minimální stavební náklady,
- dobrou reprodukovatelnost,
- tuzemské součástky,
- dobré parametry.

Pro stavbu soustavy lze z tuzemské součástkové základny vybrat dva reproduktory: ARN 6604 a ARV 3604. Tato kombinace dovoluje konstrukci soustavy

vstupní signál rozdělí na dvě pásmá s délčím kmitočtem 3000 Hz. To ovšem předpokládá dělit signál na nízké napěťové úrovni a výkonové zesilovače pro jednotlivé reproduktory navrhnut jako kmitočtově závislé.

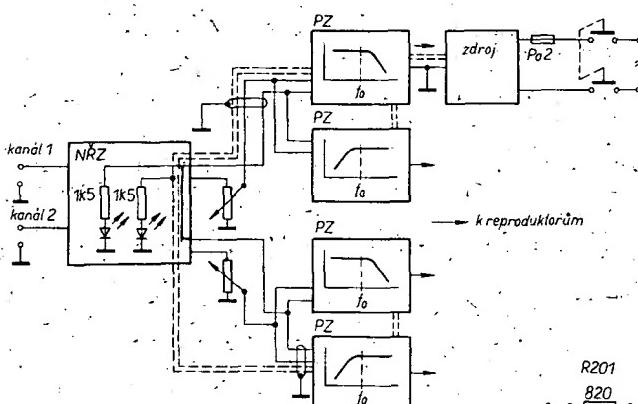
Podle obr. 1 dostávají výkonové zesilovače signál z napěťového předzesilovače. Napáječ jsem umístil do jedné z obou reproduktových skříní. Pro rozvod signálu jsem použil čtyřpramenný stíněný kabel; dva dráty k přenosu signálu a dva k napájení (zemní přívod vždy samostatný).

Na obr. 2 je zapojení výkonového zesilovače. Tranzistory T1 a T2 s proudovým zdrojem (T3, R4, D1 a D2) v emitorech tvoří rozdílový vstupní zesilovač, který řídí proudový zdroj tvořený tranzistorem T4.

trimrem P2 a diodami D3 a D4. Proudový zdroj s tranzistorem T5 je k němu komplementární. Při nulové úrovni vstupního signálu jsou proudy oběma zdroji stejné a úbytek napětí na trimru P5 je symetricky rozložen kolem nuly. Tímto trimrem lze nastavit vhodné předpětí pro budící a koncové tranzistory. Tranzistory T9 a T10 tvoří komplementární koncový stupeň. Změnou odporu R6 a R7 lze nastavit velikost zpětné vazby a tím i zesílení celého zesilovače. Kapacita C1 zaručuje stejnosměrné zesílení rovné 1 a je volena tak, aby se ani při nižších kmitočtech nezmenšoval zisk. Napájení je symetrické, což umožňuje vypustit vazebné kondenzátory mezi zesilovači a záteži. Kondenzátor C* zabraňuje případnému rozkmitání zesilovače.

Deska s plošnými spoji výkonových zesilovačů je na obr. 3. Tranzistory T6, T9 a T10 jsou umístěny na jednom chladiči, což zajišťuje teplotní stabilitu.

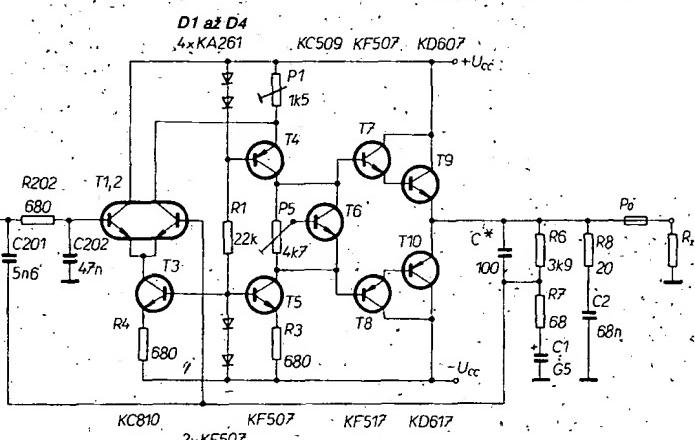
Při osazení desky s plošnými spoji je vhodné použít předem zkонтrolované a proměněné součástky. Ušetří nám to mnoho času při hledání chyb. Nejdříve připojme T4, P2, D3, D4 a oba proudové zdroje s T3 a T5. Po kontrole jejich správné funkce připojme T1 a T2 a užívme jeich báze. Pak trimrem P2 nastavíme stejně kolektorové proudy T4 a T5. Připojíme báze T1 a T2 a připojíme ostatní součástky. Na osciloskopu (nebo i sluchu) nastavíme pracovní bod tak, aby signál nebyl zkreslen a zároveň aby klidový proud nepřesáhl 60 mA. Trimrem P2 pak nastavíme symetrii výstupního signálu při velkém rozdílu vstupního napětí. Zesilovač je proti zkratu na výstupu chráněn pojistkou Po. Na obr. 2 je výkonový zesilovač zapojen, jako dolní propust. Horní propust z něj dostaneme prostou zámenou R201, R202, R203, C201, C202 za C101, C102, R103, R101, R102.

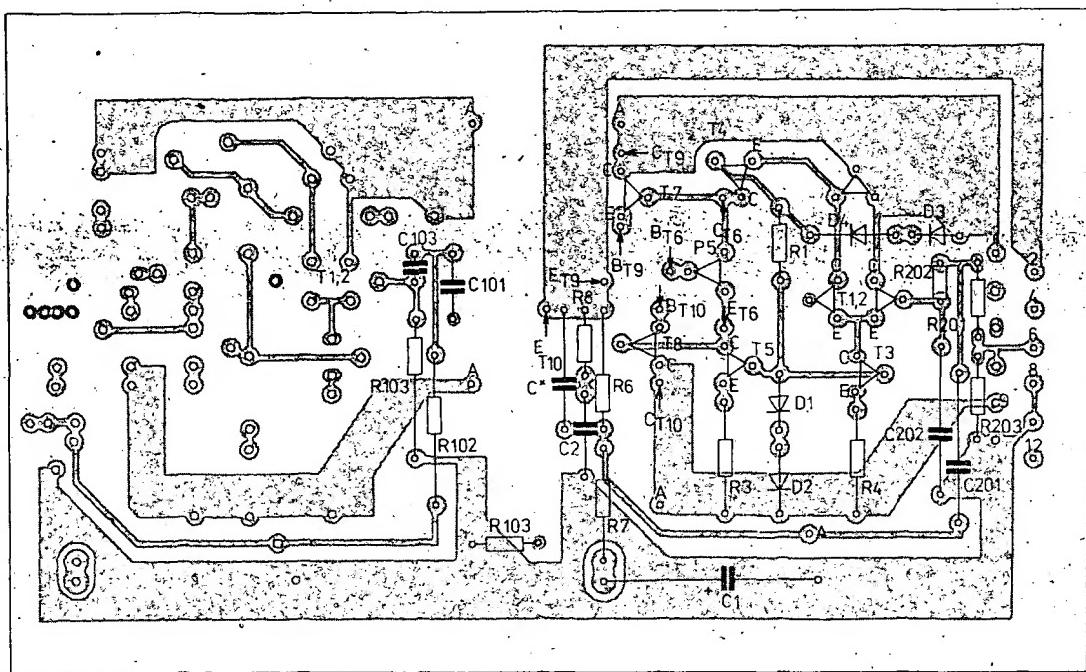
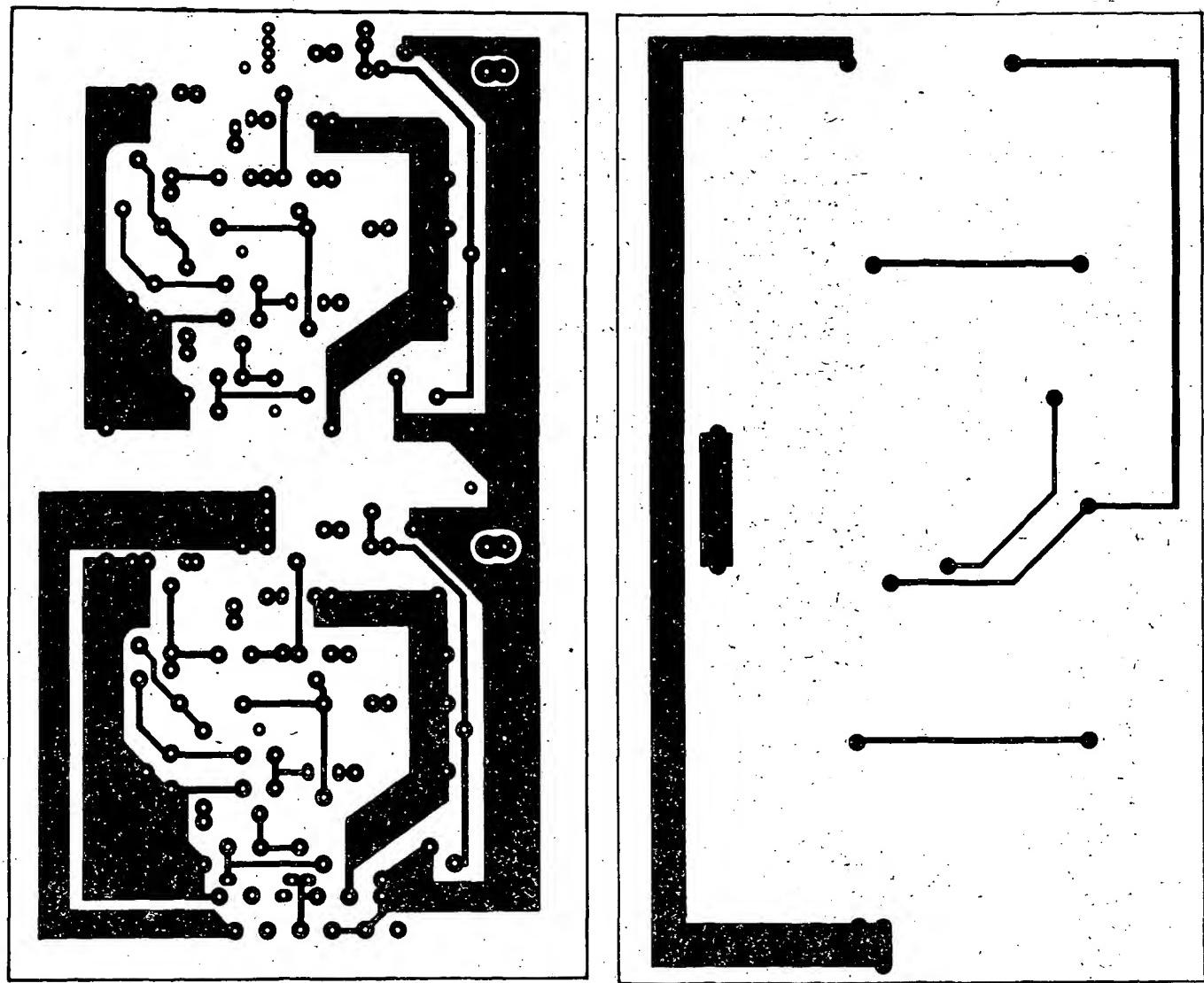


Obr. 1. Blokové schéma zapojení

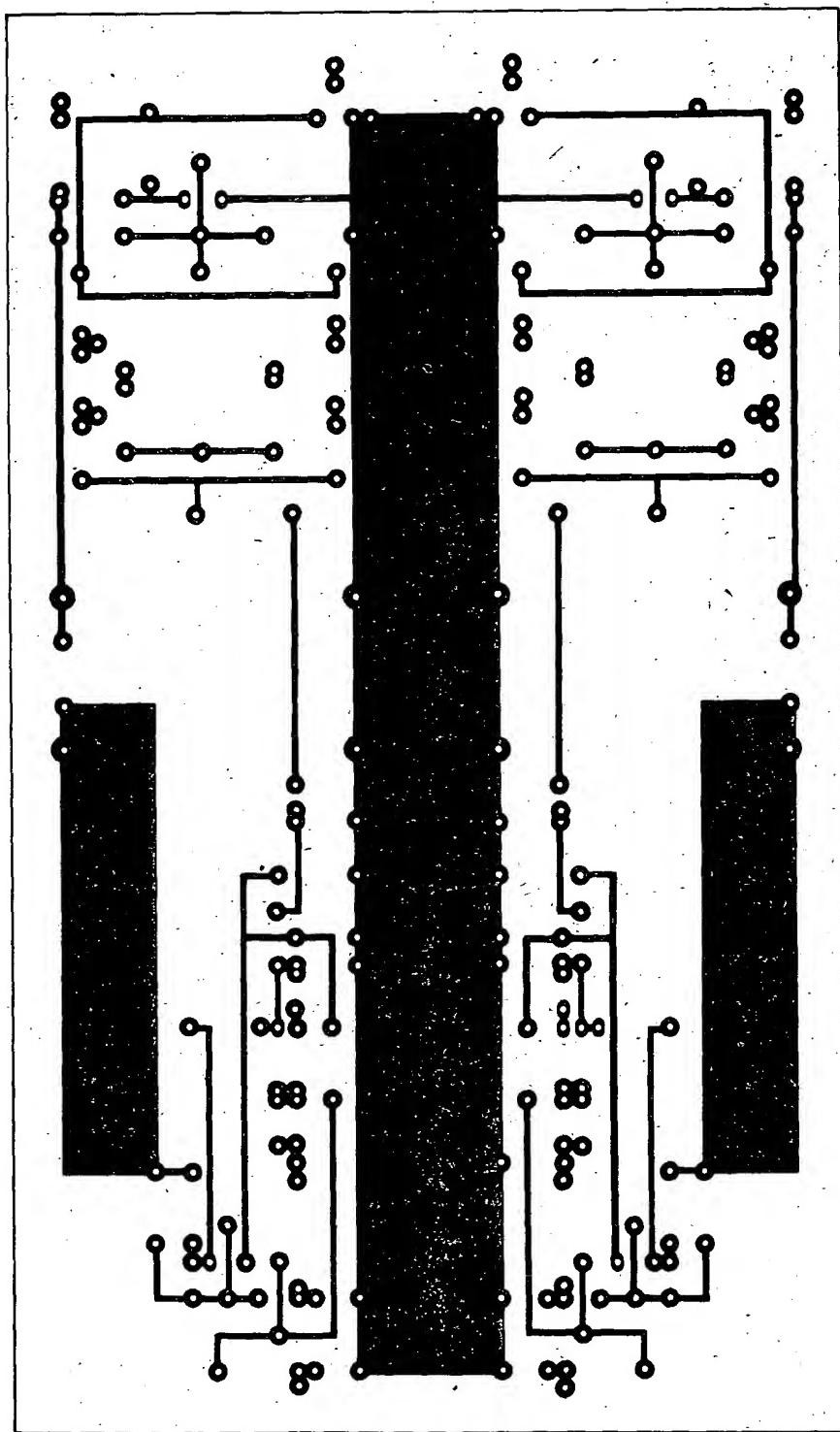
s příkonem 20 W, s dělícím kmitočtem asi 3000 Hz a s kmitočtovým rozsahem 40 až 20 000 Hz. Dvoupásmová soustava pro tento účel plně vyhovuje a je přitom relativně jednoduchá a levná.

V aktivní reproduktové soustavě jsou pasivní výhýbky nahrazeny zesilovači s kmitočtově závislým ziskem, které





Obr. 5. Deska s plošnými spoji S202



C11 0,33 µF, TC 180
 C13 1,5 nF, ker.
 C14 2 µF, TE 986
 C15 500 µF, TE 986
 C16 500 µF, TE 986
 C17 10 µF, TE 986

Potenciometry
 P1, P2, P3, P5 0,1 MΩ/N (tandemový)
 P4 50 kΩ/G (tandemový)

Polovodičové součástky
 T1 až T3 KC509
 D1, D2 LQ100

Výkonový zesilovač (jeden kanál)

Rezistory (TR 212)
 R1 22 kΩ
 R2 1,5 kΩ, TP 011
 R3 680 Ω
 R4 680 Ω
 R5 4,7 kΩ, TP 011
 R6 3,9 kΩ (5 %)
 R7 68 Ω (5 %)
 R8 20 Ω
 R103 5,6 kΩ, (5 %)
 R101 2,2 kΩ, (5 %)
 R102 33 kΩ (5 %)
 R201 820 Ω (5 %)
 R202 680 Ω (5 %)
 R203 5,6 kΩ

Kondenzátory
 C1 500 µF, TE 986
 C2 68 nF, ker.
 C* 100 pF, ker.
 C101 5,6 nF (10 %)
 C102 22 nF (10 %)
 C201 5,6 nF (10 %)
 C202 47 nF (10 %)

Polovodičové součástky
 T1, T2 KC810
 T3, T5; T7 KF507
 T4, T8 KF517
 T6 KC509
 T9 KD606
 T10 KD617
 D1 až D4 KA261

Seznam součástek

Řídicí zesilovač (jeden kanál)

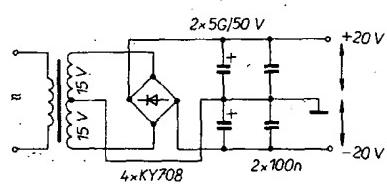
Rezistory (TR 212)

R1	47 kΩ
R2	0,22 MΩ
R3	12 kΩ
R4	0,47 MΩ
R5	3,3 kΩ
R6	560 Ω
R7	1,5 kΩ
R8	0,68 MΩ
R9	47 kΩ
R10	18 kΩ
R11	5,6 kΩ
R12	1,2 kΩ
R13	330 Ω
R14	5,6 kΩ
R15	4,7 kΩ

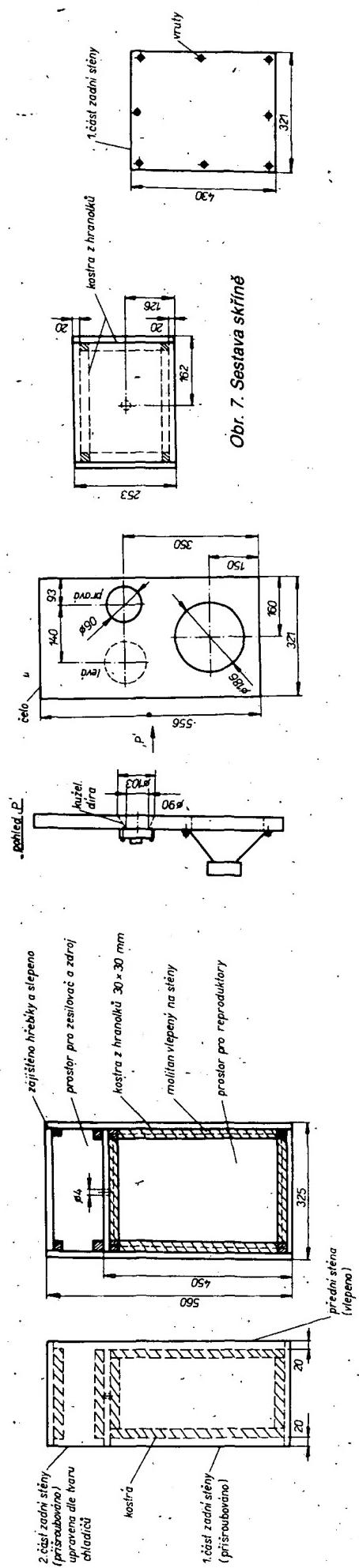
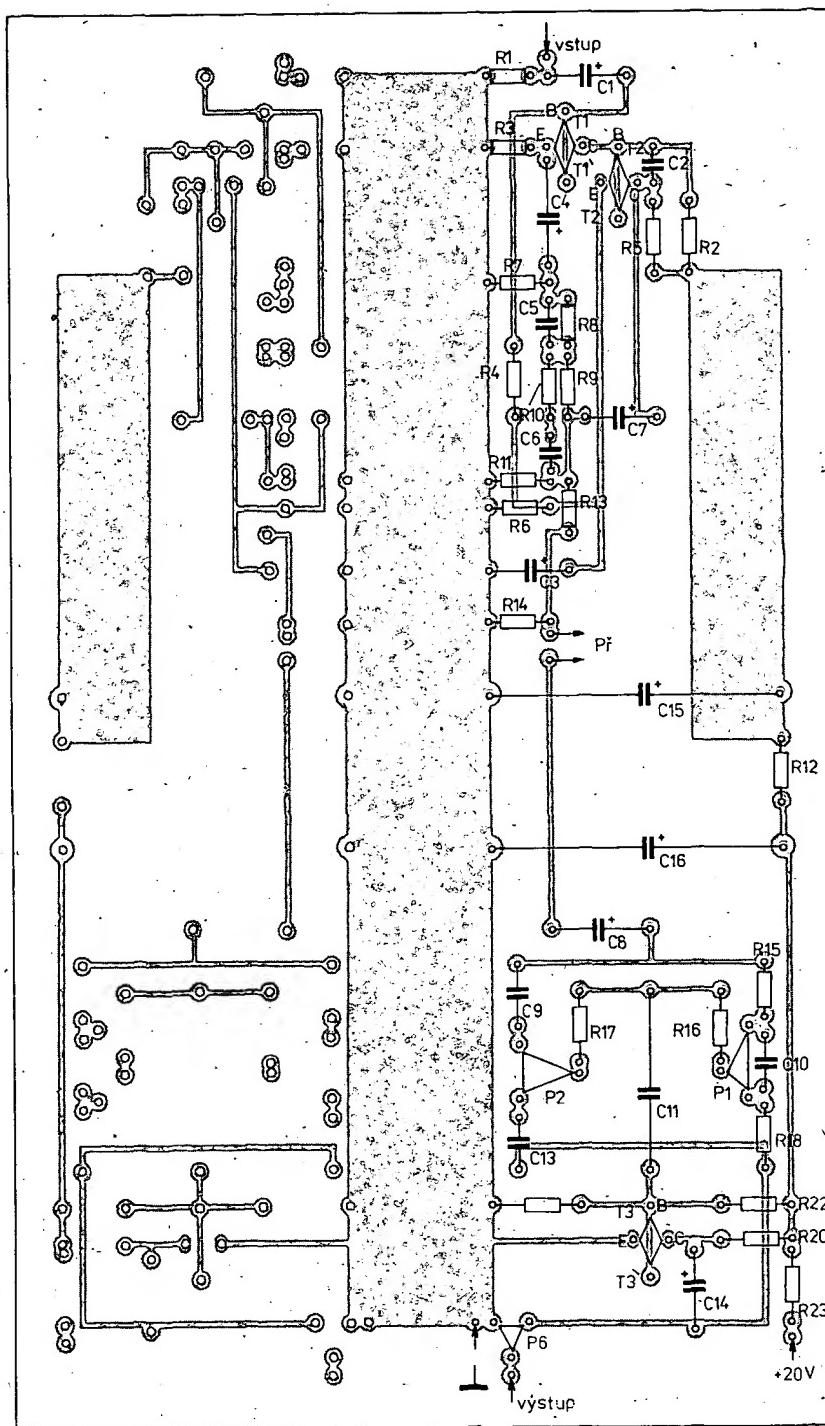
R16	47 kΩ
R17	6,8 kΩ
R18	4,7 kΩ
R19	22 kΩ
R20	4,7 kΩ
R21	0,22 MΩ
R22	27 kΩ
R23	220 Ω

Kondenzátory

C1	10 µF, TE 981
C2	100 pF, ker.
C3	10 µF, TE 986
C4	50 µF, TE 004
C5	5,6 nF, ker.
C6	1,8 nF, ker.
C7	20 µF, TE 984
C8	5 µF, TE 984
C9	1,5 nF, ker.
C10	47 nF, ker.

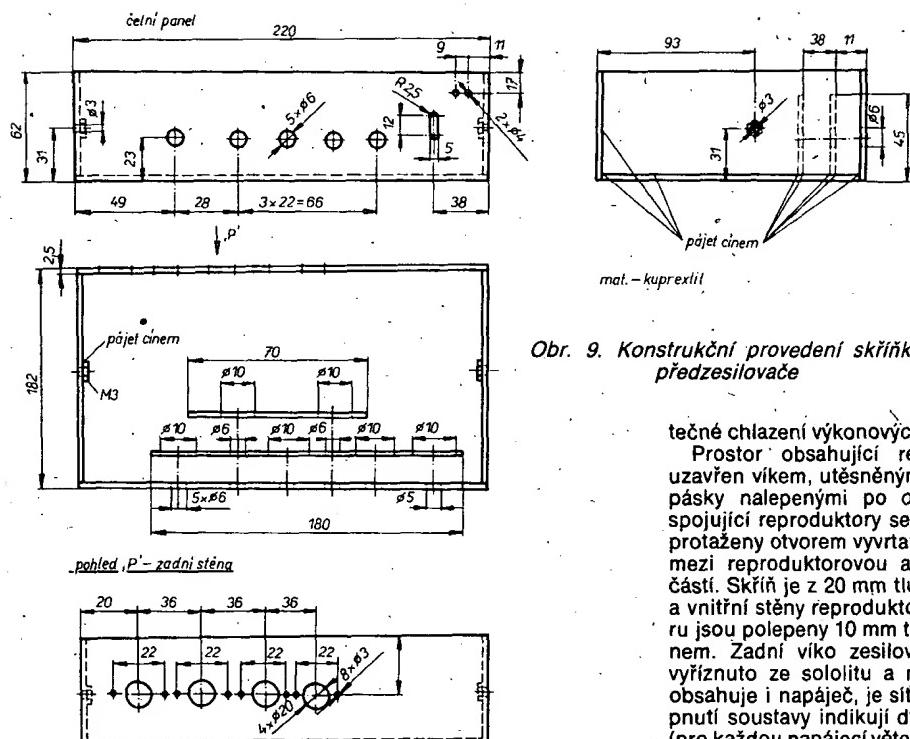


Obr. 6. Zapojení zdroje



bude zesilovač pracovat na první zapojení. Připomínám, že obdobných konstrukcí bylo již s malými obměnami uveřejněno mnoho a že na nich, aniž by to bylo na úkor jejich jednoduchosti, nelze příliš změnit. Podle potřeby lze do zesilovače přivádět signál ze dvou přepínatelných vstupů. Druhý vstup je univerzální a potenciometrem P3 lze řídit jeho citlivost. Deska s plošnými spoji řídícího zesilovače je na obr. 5.

Napájecí napětí výkonových zesilovačů je nestabilizované symetrické ± 20 V, potřebný proud do 4 A. Napájecí napětí pro



Obr. 9. Konstrukční provedení skřínky předzesilovače

tečné chlazení výkonových tranzistorů.

Prostor obsahující reproduktory je uzavřen víkem, utěsněným molitanovými pásky nalepenými po obvodu. Vodiče spojující reproduktory se zesilovačem jsou protaženy otvorem vyrtaným v přepážce mezi reproduktoru a zesilovačovou částí. Skříň je z 20 mm tlusté dřevotřísky a vnější stěny reproduktoru prostoru jsou polepeny 10 mm tlustým molitanem. Zadní víko zesilovačové části je vyříznuto ze sololitu a na skříni, která obsahuje i napájecí, je síťový spínač. Zapnutí soustavy indikují dvě svítivé diody (pro každou napájecí větev jedna) umístěné na panelu řídícího zesilovače. Skříň jsem polepil černou koženkou a čelní stěnu jsem po obroušení natřel černou matnou barvou na školní tabule. Toutož barvou jsem natřel i zadní víko. Konstrukce skřínky pro napěťový předzesilovač výplývá z obr. 8 a 9.

Návštěvník může sám využít závěrky, že R21 a C17 jsou umístěny přímo na vstupním konektoru a že jednoduchou úpravou lze výkonový zesilovač upravit na kvazikomplementární. Tato úprava si vyžaduje malou změnu na desce s plošnými spoji.

Řídící zesilovač je +20 V (obr. 6). Vstup pro magnetodynamickou přenosu má impedanci 47 kΩ, univerzální vstup 220 kΩ. Do zátěže 4 Ω při sinusovém buzení je zesilovač schopen odevzdat v hloubkovém kanálu 20 W, ve výškovém 10 W. Vstupní citlivost při tomto výkonu je na gramofonovém vstupu 4 mV/1 kHz. Při měření výkonu byly výkonové zesilovače zapojeny jako kmitočtově nezávislé.

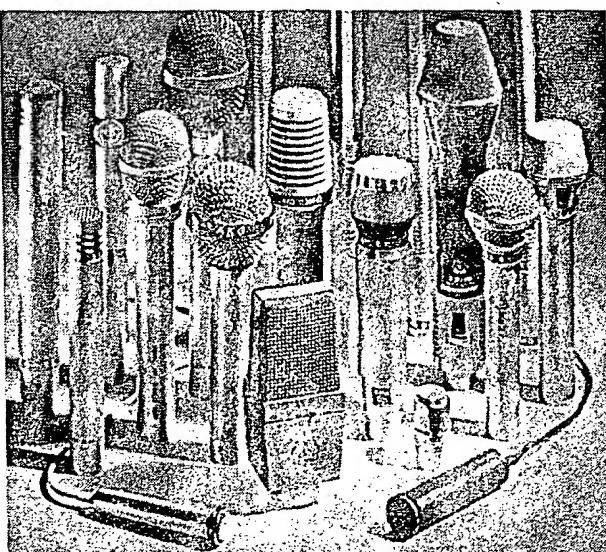
Hloubkové korekce mají rozsah ±15 dB (50 Hz), výškové ±10 dB (15 kHz).

Pro reproduktory ARN 6604 je doporučen objem skříně 30 l. Výškové systémy jsou uvedené. Do skříně jsem (do odděleného prostoru) vestavěl výkonové zesilovače a napájecí (obr. 7). Výkonový zesilovač je přišroubován k části zadního víka tak, že chladič vyčnívá ven a není v uzavřeném prostoru. Tím je zajištěno dosta-

Následující článek je určen především těm, kteří se aktivně zabývají zvukovou nahrávací technikou – členům i nečlenům svazarmovských hifiklubů a všem „lovčím“ zvuku.

VĚDĚT JAK NA TO

Oldřich ŠMEJKAL

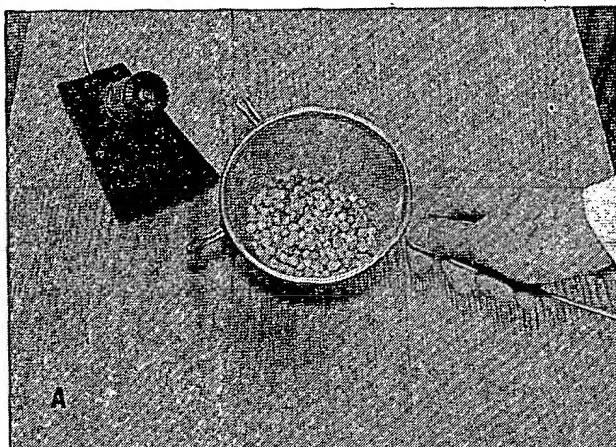


Docela nedávno jsem četl v jednom zahraničním specializovaném časopisu výsledky, podle mého názoru, velmi užitečné ankety. Uskutečnili ji výrobci spotřební elektroniky mezi jejimi používatelem a případnými zájemci prostřednictvím velkých prodejen a obchodních domů. Odpovědi na otázku: „Jak a k čemu využíváte (budeste využívat) magnetofon a videomagnetofon?“ byly skoro jednoznačné – k reprodukci záznamů z magnetofonových pásků a kazet nahrávaných

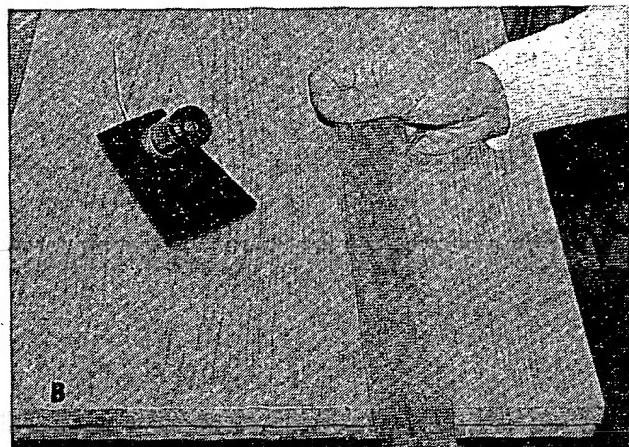
v profesionálních studiích a rozmnožených sériově. Jen asi kolem dvaceti procent dotázaných odpovědělo, že magnetofon a videomagnetofon budou používat i ke studiu, při své profesi nebo – k zájmovému fono či videoamatérské činnosti.

Jaké zjištění by podobná anketa přinesla u nás, by býlo jistě velmi zajímavé, jíž proto, že tisíce členů hifiklubů Svazarmu za více jak dvacet let své práce povýšilo

zájmovou činnost v elektroakustice a videotechnice na činnost tvůrčí a skoro profesionální. A další tisíce, hlavně mladých začínajících fonoamatérů nebo fonoamatérů neorganizovaných, se snaží své zkušené kolegy nejen dostihnout, ale i překonat.



A



B

Pro mladé a začínající fonoamatéry, kinoamatéry i fotoamatéry, kteří podle jednoduchého scénáře vytvářejí s pomocí magnetofonu zvukové reportáže, scény a hudební či slovní doprovody ke svým filmům a diapozitivům, je určen tento článek. Měl by jim alespoň v kostce poradit, jak dobré, bez obtíží a komplikací zaznamenávat doma na magnetofonový pásek i kazetu různé neobvyklé zvuky.

Jedna z velmi důležitých součástí každého magnetofonu je kvalitní mikrofon. Po ukončení prvního zkušebního záznamu přes mikrofon je proto přirozeně každý fonoamatér zvědav, jak dopadla především nahrávka jeho vlastního hlasu. Mnohý je však velmi zklamán. Vlastní hlas reprodukovaný z magnetofonového pásku mu zní cize, někdy dokonce nesympaticky.

Mikrofon, magnetofon a magnetofonový pásek však za to většinou nemohou. Vězí to v tom, že naši přátelé slyší náš hlas zcela jinak než my sami. Když totiž hovoríme, slyšíme kromě zvuku, který přichází vzduchem do vnitřního ucha, i zvuk tělesný, přenášený na bubínek zevnitř; vibraci kostry lebky, šum dechu apod. Záznam našeho hlasu na pásku proto není špatný, musíme si jen časem zvyknout poslouchat vlastní hlas jako cizí.

Pro vážnou práci v domácím studiu je však i volba správného mikrofonu zcela nezbytná. Vhodný mikrofon spoluurčuje kvalitu zvukového záznamu a jeho reprodukci. Také vyzkoušení odstupu od mikrofonu je pro kvalitní záznam velmi důležité. Proto pro snímky „natočené“ pomocí mikrofonu platí několik drobných pokynů, které se vyplatí vždy dodržovat.

HOVOR

Při záznamu mluveného slova si vždy vyhledáme správný odstup od mikrofonu. Jsme-li dále než 30 cm, může se stát, že se na pásku objeví rušivé zvukové odrazy. Že při pohrávání si s mikrofonem vzniknou ty nejpodivnější zvuky, zjistíme velmi brzy sami.

ZPĚV

Zpěváci musí svůj odstup od mikrofonu zvlášť dobře vyzkoušet. Zpívají-li velmi tiše, musí se k mikrofonu přiblížit asi na 15 až 20 cm, jinak je vhodný odstup 30 až 60 cm.

Také postavení mikrofonu při záznamu hudebních nástrojů nejsnadněji vyzkoušíme tak, že mikrofon upevníme třeba na upravený fotostativ. Následující pravidla pro vzdálenost mikrofonu při záznamu tónů nejběžnějších hudebních nástrojů nám mohou při naší práci velmi pomoci.

KLAVÍR

Mikrofon umístíme do výšky asi 1,5 až 2 m, nejlépe v poloviční výši, otevřené rezonanční desky do jejího středu.

PIANINO

Mikrofon postavíme do vzdálenosti 1 až 1,5 m od pravého rohu klaviatury a asi 0,5 m nad její úrovni.

AKORDEON

Mikrofon zaměříme přesně na nástroj v odstupu asi 0,7 až 1,2 m. Zde však pozor! Při nahrávce se musíme vyvarovat příjmu rušivých hluků při natahování méchu akordeonu.

SMYČCOVÉ NÁSTROJE

Nejmenší odstup mikrofonu (0,5 až 1 m) určujeme vždy podle velikosti ná-

stroje a intenzity jeho zvuku. U houslí postavíme mikrofon vedle hmatníku nástroje, před cellem nebo kontrabasem k jeho korpusu.

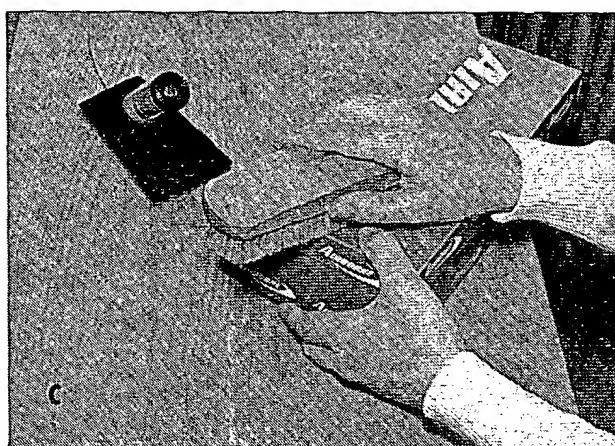
DECHOVÉ NÁSTROJE

U trouby, pozounu atd. postavíme mikrofon přesně 1 m od vyústění nástroje, u dřevěných dechových nástrojů v poněkud menší vzdálenosti.

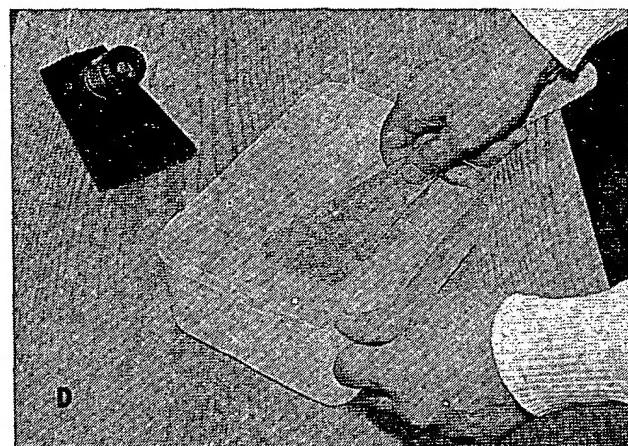
Poloha mikrofonu je tedy vždy důležitá, ať už jde o jakoukoliv nahrávku. Nejhodnější polohu vyzkoušíme před každým záznamem. Pro práci s mikrofonem si vybereme samozřejmě nejklidnější místo; kam nedoléhá pouliční hluk; jsou-li v pokoji závěsy, roztahneme je, aby nevznikly zvukové odrazy. Závěsy však nesmějí ležet na stěně, nýbrž musí být jen volně zavěšeny a zraseny. Velmi vhodné pro domácí studio jsou i větší hobrové desky přibité na dřevěných rámech. Desky se umístí v několika centimetrově vzdálenosti od stěn. Také koberce, knihy v nezasklených policových stěnách, čalouněná křesla a pohovky dobře pohlcují zvuk.

Mnohé zvukové reportáže, scény i zvukové doprovody amatérských filmů a diapozitivů však často ještě potřebují doplnit charakteristickými zvuky. Pro vytvoření dojmu „prostoru“ a iluze skutečnosti jsou tyto zvuky nepostradatelné.

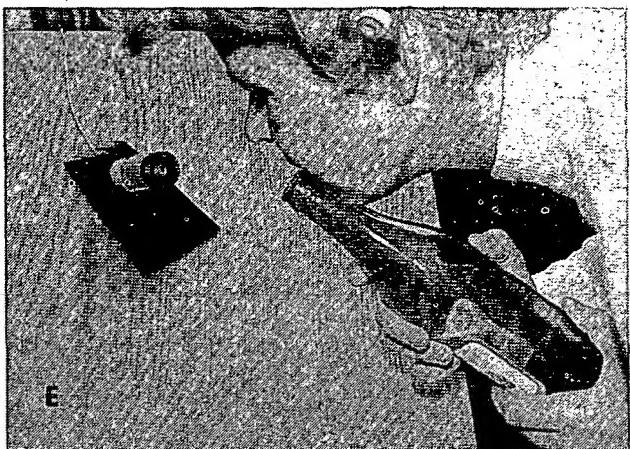
Různé uměle vytvořené zvuky lze amatérsky vyrobit přímo před mikrofonem tak dokonale, pohodlně a snadno, že při reprodukci znějí zcela přirozeně. Při vytváření nepostradatelných zvuků je však třeba stále zkoušet, především správnou vzdálenost mezi zdrojem zvuku a mikrofonem. Prostě vždy musíme vědět jak na



C



D



to. Jak se imitované zvuky dají vyrábět v domácím studiu, vysvětlují obrázky.

DÉŠŤ – obr. A

Mírný déšť i velký liják se dají doma snadno udělat. Necháme-li před mikrofonem převalovat dvacet až třicet suchých zrnek hrachu po hustém sítu nebo drátěnému plátnu, vznikne na pásku zvukový trik počínající několika kapkami deště a končící vytrválym líjákem. Podle rychlosti převalování hrachu lze vyprodukovat každé množství zvuků. Někteří fonoamateur však doporučují přidržovat mikrofon nejlépe pod sítem.

VÁNEK A VICHŘ – obr. B

K výrobě vánku nebo vichru nám postačí stará dámská silonová punčocha nebo kousek hedvábí. Budeme-li pak vypnutou látku přetahovat před mikrofonem přes

hranu stolu či desky z měkkého dřeva, vytvoříme umělé zvuky od vánku až po burácející vichr.

HROM

Také hrom lze amatérsky snadno vytvořit. Zatreseme-li v dostatečné vzdálenosti od mikrofonu větší deskou tenkého plechu, vznikne hrom jedna radost. I silné fouknutí přímo na mikrofon může být od hromu k nerozeznání. Zkušení fonoamatori dělají hrom tak, že nahrají na pásek akordy hrané na klavíru, které pak na magnetofonu přehrávají poloviční rychlosť. Musí se to ovšem dobře vyzkoušet.

HUKOT MOŘE – obr. C

Iluze skutečného hukotu moře se vytvoří pomocí obyčejného kartáče a prázdné krabice od bot. Přejíždíme-li před mikrofonem kartáčem od bot v rytmických

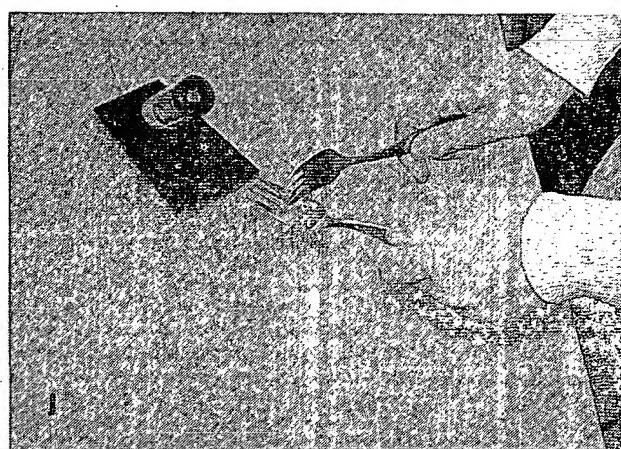
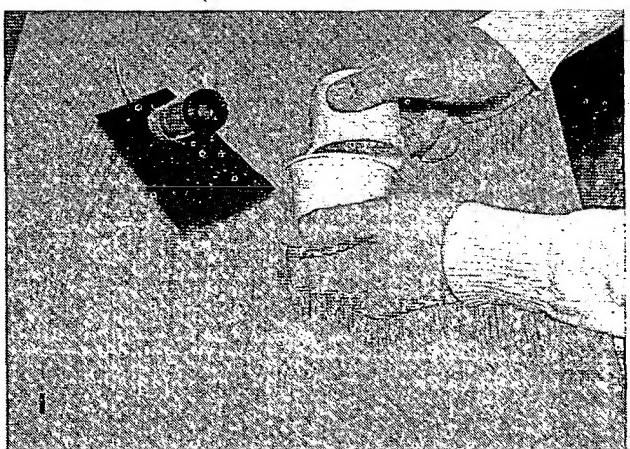
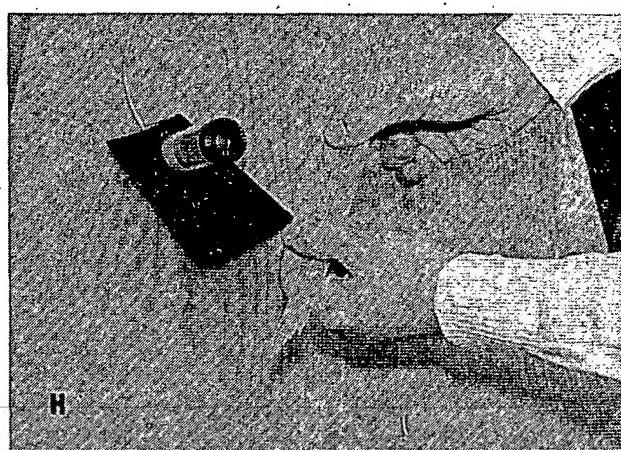
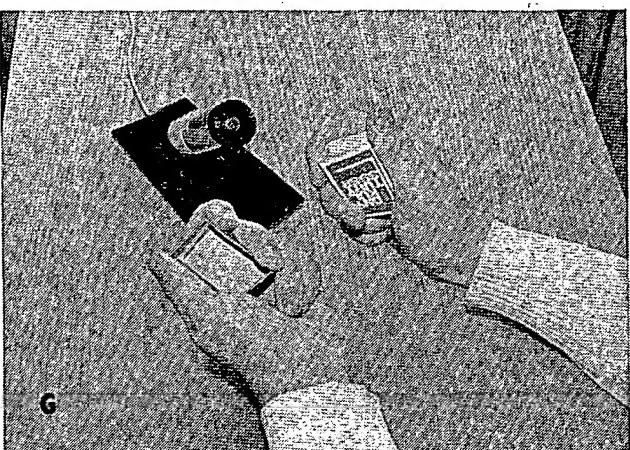
intervalech po prázdné krabici získáme hukot (slabší či bouřlivější) vln jezera nebo oceánu. Také přejíždění dvěma kartáči proti sobě po dlouhém kusu plechu vyvolává zvuk vlnění na moři.

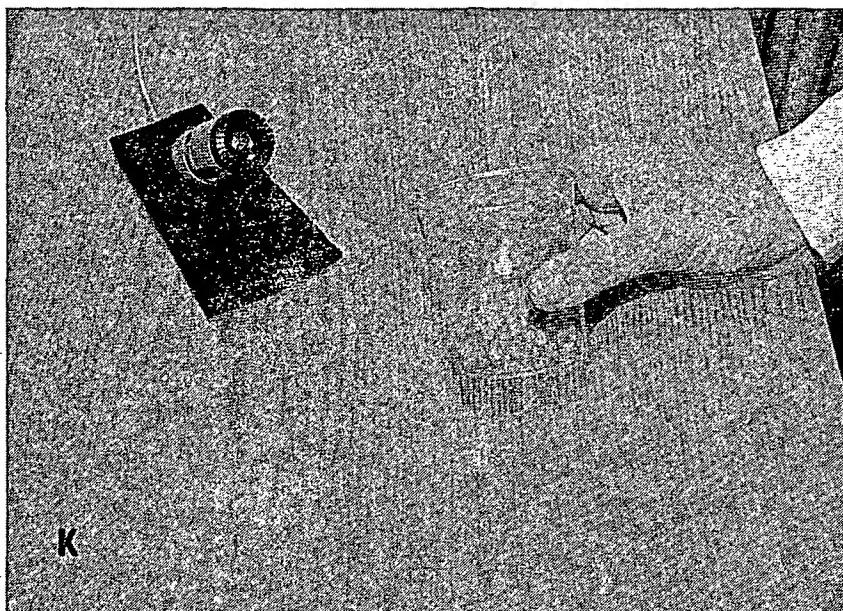
VLNY – obr. D

K výrobě zcela „přirozených“ vln nám dočela postačí nádoba z plastické hmoty a obyčejná voda z vodovodu. Při míchání několika litrů vody, stěrkou na těsto sem a tam, nebo pohybem ruky tak, aby voda lehce šplouchala na stěny nádoby, vznikne věrný zvuk úderu vln o břeh nebo hráz.

JÍZDA NA PRAMICI

S dvěma prkénky a dveřmi se dá udělat další domácí kouzlo. Veslujeme-li dvěma prkénky, ve vodě a ve stejném rytmu vrzáme dveřmi, vyprodukujeme nádhernou projížďku na pramici.





LODNÍ SIRÉNA – obr. E

Chceme-li napodobit houkání parníku, použijeme k tomuto zvukovému triku prázdnou láhev od piva. Silné foukání přes hrdo láhev před mikrofonem dokáže imitovat ochraptělý zvuk lodní sirény. Výšku tónu můžeme libovolně měnit časťným doléváním vody do lávky. Čím více bude vody v lávce, tím vyšší bude vydávaný tón.

OHEŇ – obr. F

K vytvoření intimního praskání ohně v krbu, popřípadě hluku velkého požáru, nám postačí archi celofánu. Mačkáme-li celofán ve vhodné vzdálenosti od mikrofona, obdržíme při reprodukci nahrávky zvuk praskajícího ohně, který od skutečného nepozná ani zkušený požárník. Velký oheň se ovšem dá udělat také tak, že se mačká před mikrofonem skelný papír.

LÁMÁNÍ DŘEVA – obr. G

Zvuk lámaného dřeva lze imitovat pomocí prázdné krabičky od zápalék. Vdali

zmáčknutá krabička dá před mikrofonem perfektní zvuk lámajícího se dřeva.

KROKY

Na kroky v lese nám postačí kus starého magnetofonového pásku. Ten vezmeme a hrstí a mačkáme ho v rytmu chůze před mikrofonem.

KROKY NA SNĚHU

Na vytvoření imitace zvuku chůze po sněhu postačí trocha škrabu nebo bramborové, moučky, PVC sáček: naplněný škrabem stlačujeme před mikrofonem v pravidelném rytmu, asi tak, jako jde ve skutečnosti člověk po zmrzlé, vrzající sněhu.

LYŽOVÁNÍ

K domácímu lyžování je nejvhodnější malé ploché prkénko a drsná příkrývka. Zvuk lyží vznikne, posouváme-li prkénko po příkrývce, chvílemi blízko, chvílemi od mikrofona.

CESTA RÁKOSÍM – obr. H

I obtížná cesta rákosím se dá v klidu pokoje snadno vykouzlit. Lámemeli-li před mikrofonem svazek makaronů nebo špa-

get, dosáhneme zvukové iluze, že jsme si klestili cestu rákosím.

DUSOT KOPYT – obr. I

Potřebujeme-li nahrát zvuk běžícího koně, pak postačí, když budeme tlouci před mikrofonem okraji dvou prázdných pohárků z plastické hmoty o sebe. Při reprodukci záznamu pak zjistíme, že jsme tímto jednoduchým trikem udělali dokonalou imitaci dusotu koňských kopyt. Podle rychlosti narážení pohárků o sebe pak vznikne klus nebo trysk. Stejný zvuk lze udělat, vezmeme-li dvě prázdné půlký kokosového ořechu, kterými o sebe klepeme. Obalime-li je šátkem, budou cválat koně po louce nebo lesem.

VÝSTŘELY

Tyto zvuky se dají rychle a snadno imitovat s pomocí pravítka. Uhodíme-li před mikrofonem krátké a prudce dřevěným pravítkem naplněno o desku stolu, pak nám při přehrávání pásku z magnetofonu zazní výstrel z pistole či pušky. Výstrel z děla můžeme při ozvučování udělat tak, že před mikrofonem uhodíme balíkem časopisů o desku stolu.

ŘINCENÍ MEČŮ – obr. J

I doma lze imitovat staré rytířské hry. Budeme-li tlouci před mikrofonem dvěma vidličkami v rytmu o sebe, získáme podle vzdálenosti od mikrofona, nejlítejší souboj dvou ozbrojenců.

REZÁNÍ PILOU

Tento zvukový trik vytvoří prázdná krabička od zápalék. Posunujeme-li sem a tam prázdný vnitřek obalu, vzniknou při reprodukci zcela přirozené zvuky pily, od kutilské pilky až po zvuky pily kotoučové (podle vzdálenosti od mikrofona).

JÍZDA LOKOMOTIVY

Potřebujeme-li na magnetofonovém pásku zaznamenat jízdu lokomotivy, uděláme to před mikrofonem tak, že budeme třít o sebe dvě prkénka potažená hedvábím papírem.

LET TRYSKOVÉHO LETADLA

Burácení proudového motoru se dá snadno vytvořit pomocí elektrického vysoušeče na vlasy. Ten zapnutý podržíme před mikrofonem. Zanikání zvuku motoru dosáhneme vhodně přidržovaným kouskem kartánu, který vsuneme do proudu vzduchu od vysoušeče.

GONG

S pravítkem a sklenkou na víno se dá udělat další domácí kouzlo. Klepneme-li před mikrofonem několikrát lehce pravítkem do okraje vinné sklenky s nožkou, zazní „skleněný“ gong, který je k nerozeznání od skutečného.

DEFEKT STROJE – obr. K

Hrách se dá také využít k imitaci zvuku porouchaného stroje. Uvedeme-li před mikrofonem do krouživého pohybu (v poháru z plastické hmoty) zrnka suchého hrachu, získáme zvuky porouchaného stroje, zadřeného ložiska apod.

HLAS V TELEFONU – obr. L

Také iluze telefonního hovoru se dá snadno vytvořit. Mluvime-li před mikrofonom do větší vázy nebo kameninového hrnku, uděláme zvukový snímek, který je při reprodukci k nerozeznání od skutečného telefonního hovoru.